



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁHRADA ROTAČNÍCH SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ STATICKÝMI KOMPENZÁTORY V PODNIKU PETROCHEMIE

REACTIVE POWER COMPENSATION IN PETROCHEMIE COMPANY USING A PASSIVE POWER
FACTOR CORRECTION SYSTEM INSTEAD OF SYNCHRONOUS GENERATORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ROSTISLAV MARTINÁK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Rostislav Martinák

ID: 111092

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

**Náhrada rotačních synchronních generátorů statickými kompenzátory
v podniku Petrochemie**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Kvalita elektrické energie, kvalita napětí, výkonová teorie
2. Prostředky pro paralelní kompenzaci
3. Popis stávajícího stavu
4. Předběžný návrh charakteru statické kompenzace
5. Sestavení modelu a provedení simulace pro určení parametrů a vlastností navržené kompenzace
6. Vyhodnocení interference kompenzace s podnikovou sítí

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

MARTINÁK, R. *Náhrada rotačních synchronních generátorů statickými kompenzátory v podniku Petrochemie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především svým rodičům za morální i materiální podporu během celé doby mého studia. Dále bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D, za poskytnuté materiály a věcné připomínky.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

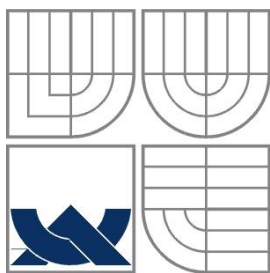
Náhrada rotačních synchronních generátorů statickými kondenzátory v podniku Petrochemie

Bc. Rostislav Martinák

vedoucí: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

Reactive power compensation in Petrochemie company using a passive power factor correction system instead of synchronous generators

Bc. Rostislav Martinák

Supervisor: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Brno University of Technology, 20012

Brno

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou kompenzace jalového výkonu, konkrétně náhradou stávajících synchronních generátorů statickou kompenzací v podniku petrochemie, jako součást zakázky firmy Kompel. V práci je rozebrána problematika definice výkonu v obvodech s harmonickými i neharmonickými napětími a proudy. Dále jsou v práci popsána kompenzační zařízení používaná v průmyslových a distribučních sítích na hladině nízkého a vysokého napětí. Poslední čtyři kapitoly jsou věnovány popisu stávajícího stavu elektrárny petrochemického podniku, posouzení možnosti využití stávajících kompenzací, návrhu nového kompenzačního zařízení a ověření funkce kompenzačních zařízení simulacemi.

KLÍČOVÁ SLOVA: kompenzace jalového výkonu, kompenzace účinníku, rotační synchronní generátor, statická kompenzace, výkonová teorie

ABSTRACT

This thesis deals with the reactive power compensation, namely the possibility of reactive power compensation in Petrochemie company using a passive power factor correction system instead of synchronous generators, as part of the contract Kompel company. The thesis analyzes problems of definition of power in circuits with sinusoidal and nonsinusoidal voltages and currents. Furthermore, this thesis describes the power factor correction systems used in the low and medium voltage industrial and distribution networks. The last four chapters contain description of the existing state of power plant in Petrochemie company. There are considered the possibility of use of existing power factor correction system owned by company. The new static power factor correction system is suggested and functionality of power factor correction systems is verified through the simulations.

Key words: reactive power compensation, power factor correction, rotating synchronous generator, passive power factor correction system, power theory

OBSAH

OBSAH.....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK.....	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1. ÚVOD.....	17
2. CÍL PRÁCE.....	18
3. KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	19
3. 1 KVALITA NAPĚTÍ.....	19
3. 1. 1 CHARAKTERISTIKY NAPĚTÍ.....	19
4. VÝKON VE STŘÍDAVÝCH OBVODECH.....	21
4. 1 HARMONICKÁ NAPĚTÍ A PROUDY.....	21
4. 2 NEHARMONICKÁ NAPĚTÍ A PROUDY.....	24
4. 2. 1 TEORIE PROUDOVÝCH FYZIKÁLNÍCH SLOŽEK – CPC.....	27
5. KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU.....	33
5. 1 ÚVOD DO KOMPENZACE.....	33
5. 2 ROZDĚLENÍ KOMPENZACE (KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ).....	35
5. 2. 1 PODLE UMÍSTĚNÍ KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	35
5. 2. 2 PODLE PRINCIPU ČINNOSTI.....	36
5. 2. 3 PODLE ZPŮSOBU REGULACE.....	36
6. KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ V PRŮMYSLOVÝCH SÍTÍCH NÍZKÉHO A VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	37
6. 1 ROTAČNÍ KOMPENZÁTORY.....	37
CHOD NAPRÁZDNO [10].....	37
CHOD S NULOVÝM ČINNÝM VÝKONEM [10].....	37
CHOD S NENULOVÝM ČINNÝM VÝKONEM [10].....	38
6. 2 STATICKÉ KOMPENZÁTORY.....	39
6. 2. 1 INDIVIDUÁLNĚ PŘIPOJENÉ KONDENZÁTORY.....	39
6. 2. 2 STUPŇOVITĚ SPÍNANÉ KOMPENZÁTORY S PROSTÝMI KONDENZÁTORY.....	39
6. 2. 3 STUPŇOVITĚ SPÍNANÉ KOMPENZÁTORY S CHRÁNĚNÝMI (HRAZENÝMI) KOMPENZAČNÍMI SEKCEMI.....	42
6. 2. 4 PLYNULE ŘÍZENÉ KOMPENZAČNÍ FILTRY.....	43
6. 2. 5 AKTIVNÍ FILTRY.....	44

6. 3 POROVNÁNÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ Z POHLEDU CPC.....	46
7. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU ELEKTRÁRNY.....	48
7. 1 STÁVAJÍCÍ STAV	48
7. 2 MĚŘENÍ.....	48
7. 2. 1 VÝSELDKY MĚŘENÍ.....	49
7. 2. 2 SHRUTÍ MĚŘENÍ	51
8. POSOUZENÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ.....	52
POPIS STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ RCPA 1,2 A RCPB 1,2	52
8. 1 URČENÍ VELIKOSTI KOMPENZAČNÍHO VÝKONU	52
8. 2 VLIV NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ KVALITY ELEKTRINY	53
8. 3 KONTROLA ZKRATOVÉ ODOLNOSTI A ODSÁVÁNÍ SIGNÁLU HDO	54
8. 3. 1 KONTROLA NA ODOLNOST PROTI ZKRATU	54
8. 3. 2 KONTROLA ODSÁVÁNÍ SIGNÁLU HDO A SPÍNACÍCH PROUDŮ	55
8. 4 NÁVRH KABELU PRO PŘIPOJENÍ KOMPENZACÍ.....	57
9. NÁVRH NOVÉHO KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	59
9. 1 POTŘEBNÁ HODNOTA KOMPENZAČNÍHO VÝKONU	59
9. 2 VLIV NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ KVALITY ELEKTRINY	60
9. 3 VOLBA VELIKOSTI A POČTU STUPŇŮ.....	60
9. 4 NÁVRH SPÍNACÍCH REAKTORŮ	63
9. 5 KONTROLA NA ODSÁVÁNÍ SIGNÁLU HDO	64
10. SESTAVENÍ MODELŮ A OVĚŘENÍ FUNKCE KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SIMULACEMI.....	66
10. 1 PARAMETRY PRVKŮ SIMULACE	66
10. 2 OVĚŘENÍ FUNKCE NOVÉHO KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ	67
10. 3 OVĚŘENÍ FUNKCE STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ	72
11. ZÁVĚR.....	74
POUŽITÁ LITERATURA.....	76
SEZNAM PŘÍLOH	79

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1: Průběh okamžitého výkonu [1]	22
Obr. 4.2: Okamžitý výkon (rezistor)[1]	22
Obr. 4.3: Okamžitý výkon (induktor, kapacitor)[1]	22
Obr. 4.4: Fázor komplexního výkonu	23
Obr. 4.5: Obecná zátěž a její ekvivalentní odporová zátěž se stejným činným výkonem P [15]	28
Obr. 4.5: Třífázový systém[15]	29
Obr. 4.6: Obecná zátěž a její ekvivalentní odporová zátěž se stejným činným výkonem P [15]	30
Obr. 4.7: Ekvivalentní zátěž ke skutečné zátěži na Obr. 4.6 vlevo [15]	30
Obr. 5.1: Fázorový diagram	33
Obr. 5.2: Paralelní kompenzace	34
Obr. 5.3: Fázorový diagram vedení s paralelní kompenzací [4]	34
Obr. 6.1: K principu paralelní práce synchronního generátoru a) náhradní schéma, b), c), d)	37
Obr. 6.2: K principu SS	38
Obr. 6.3: V-křivky SS	38
Obr. 6.4: Připnutí kondenzátoru k síti [25]	40
Obr. 6.5: Připnutí kondenzátoru paralelně k nabitě kondenzátorové baterii [25]	40
Obr. 6.6: Klasická kompenzace na hladině VN [20]	41
Obr. 6.7: K sériové rezonanci [3]	42
Obr. 6.8: Bezkontaktní (vlevo) a stykačově spínaná (vpravo) hrazená kompenzace na NN [22]	43
Obr. 6.9: Plynule řízené kompenzační filtry [3]	44
Obr. 6.10: Základní stavební prvek aktivních filtrů (napětový střídač) [28]	45
Obr. 6.11: Derivační (paralelní) aktivní filtr [12]	45
Obr. 6.12: Sériový aktivní filtr [12]	46
Obr. 6.13: Kombinovaný aktivní filtr [12]	46
Obr. 7.1: Zjednodušené schéma rozvoden 110 kV a 6 kV petrochemického podniku	48
Obr. 9.3: Paralelní spolupráce transformátorů T101 a T103 do rozvodny R201	59
Obr. 10.1: Model sítě petrochemického podniku s instalovanou novou kompenzací	67
Obr. 10.2: Změna účinníku při sepnutí druhého kompenzačního stupně	68

Obr. 10.3: Průběhy odebíraných jalových výkonů.....	68
Obr. 10.4: Úroveň signálu HDO při sepnutí všech stupňů kompenzace	69
Obr. 10.5: Vliv reaktorů na frekvenci a amplitudu spínacího proudu.....	69
Obr. 10.6: Omezení přechodného proudu při uvažování reaktance sítě (reaktance sítě 110 kV i reaktance napájecích transformátorů 110/6,3 kV)	70
Obr. 10.7: Omezení přechodného proudu při uvažování sítě a zátěže.....	70
Obr. 10.8: Průběh napětí při sepnutí bez vlivu zátěže	71
Obr. 10.9: Průběh napětí při sepnutí s příznivým vlivem zátěže.....	71
Obr. 10.10: Model pro ověření funkce spínacích reaktorů.....	72
Obr. 10.11: Průběh účinníku při sepnutí 2 stupňů kompenzace	72
Obr. 10.12: Průběhy odebíraných jalových výkonů.....	73
Obr. 10.13: Úroveň signálu HDO při sepnutí všech stupňů kompenzace	73

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 8-1: Kapacita kondenzátorových baterií ($C_n = 110 \mu F$)</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 9-1: Rozdělení výkonů do jednotlivých stupňů.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 10-1: Parametry transformátorů 110/6,3 kV [27].....</i>	<i>66</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

\bar{A}	nesymetrická admitance	[S]
\bar{A}_n	nesymetrická admitance n-té harmonické	[S]
B_e	ekvivalentní susceptance	[S]
B_{en}	ekvivalentní susceptance n-té harmonické	[S]
B_n	susceptance n-té harmonické	[S]
C	kapacita	[F]
D_s	výkon způsobený rozptýlenou složkou proudu	[VAs]
D	deformační výkon, výkon způsobený nesymetrickou složkou proudu	[VAdef]
\bar{E}	fázor indukovaného napětí	[V]
f_r	rezonanční frekvence	[Hz]
f_n	nominální (jmenovitá) frekvence	[Hz]
G_e	ekvivalentní vodivost	[S]
G_{en}	ekvivalentní vodivost n-té harmonické	[S]
G_n	vodivost n-té harmonické	[S]
I	efektivní hodnota proudu	[A]
\bar{I}	fázor efektivní hodnoty proudu	[A]
I_a	efektivní hodnota činné složky proudu	[A]
I_b	efektivní hodnota jalové složky proudu	[A]
I_{ζ}	činná složka proudu	[A]
I_{ef}	efektivní hodnota proudu	[A]
I_j	jalová složka proudu	[A]
I_k''	počáteční rázový zkratový proud	[A]
I_{km}	nárazový zkratový proud	[A]
I_{max}	amplituda proudu	[A]
$I_{max\ n}$	maximální hodnota n-té harmonické proudu	[A]
I_n	jmenovitá hodnota proudu, efektivní hodnota n-té harmonické proudu	[A]
I_0	stejnoseměrná složka proudu	[A]
I_r	efektivní hodnota jalové složky proudu	[A]
I_s	efektivní hodnota rozptýlené složky proudu	[A]

L	indukčnost	[H]
M	moment	[N·m]
P	činný výkon	[W]
ΔP	ztráty činného výkonu	[W]
Q	jalový výkon	[VAr]
Q_n	jalový výkon n-té harmonické	[VAr]
R	odpor	[Ω]
S	zdánlivý výkon	[VA]
\bar{S}	komplexní výkon	[VA]
T	perioda	[s]
U	efektivní hodnota napětí	[V]
\bar{U}	fázor efektivní hodnoty napětí	[V]
U_{ef}	efektivní hodnota napětí	[V]
U_{max}	amplituda napětí	[V]
$U_{max\ n}$	maximální hodnota n-té harmonické napětí	[V]
U_n	jmenovitá hodnota napětí, efektivní hodnota n-té harmonické napětí	[V]
U_0	stejnoseměrná složka napětí	[V]
ΔU	úbytek napětí	[V]
X	reaktance	[Ω]
X_c	kapacitní reaktance	[Ω]
X_n	obecný třífázový vektor obecných fázorů n-té harmonické	[-]
\bar{Y}	admitance	[S]
\bar{Y}_e	ekvivalentní admitance	[S]
\bar{Z}_z	impedance zátěže	[Ω]
\bar{a}	operátor natočení	[-]
$\cos\varphi$	účinník	[-]
e	Eulerovo číslo	[-]
g_I	činitel deformace proudu	[-]
i	okamžitá hodnota elektrického proudu	[A]
i_a	okamžitá hodnota činné složky proudu	[A]

i_b	okamžitá hodnota jalové složky proudu	[A]
i_r	okamžitá hodnota jalové složky proudu	[A]
i_s	okamžitá hodnota rozptýlené složky proudu	[A]
i_u	okamžitá hodnota nesymetrické složky proudu	[A]
i	třífázový vektor fázových proudů	[A]
i_a	třífázový vektor činných složek fázových proudů	[A]
i_r	třífázový vektor jalových složek fázových proudů	[A]
i_s	třífázový vektor rozptýlených složek fázových proudů	[A]
i_u	třífázový vektor nesymetrických složek fázových proudů	[A]
j	imaginární jednotka	[-]
n	řád harmonické	[-]
p	okamžitý výkon, činitel zacívkování	[W, -]
t	čas	[s]
u	okamžitá hodnota elektrického napětí	[V]
u	třífázový vektor fázových napětí	[V]
x	obecný třífázový vektor	[-]
x_n	obecný třífázový vektor n-tých harmonických	[-]
$\ x\ $	efektivní hodnota obecného třífázového vektoru	[-]
ψ_i	počáteční fáze proudu	[rad]
ψ_n	počáteční fáze h-té harmonické napětí nebo proudu vůči první harmonické	[rad]
ψ_u	počáteční fáze napětí	[rad]
α	úhel	[rad]
β	úhel	[rad]
λ	opravdový účinník	[rad]
φ	fázový posun mezi napětím a proudem	[rad]
φ_n	fázový posun mezi n-tou harmonickou napětí a proudem	[rad]
ω	úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]
ω_r	rezonanční úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]

POUŽITÉ ZKRATKY:

CPC	currents physical components
HDO	hromadné dálkové ovládání
IEC	international elctrotechnical comission
IEEE	institute of electrical and elctronics engineers
JTN	jistící transformátor napětí
JTP	jistící transformátor proudu
MTN	měřící transformátor napětí
MTP	měřící transformátor proudu
NN	nízké napětí
SS	synchronní stroj
VN	vysoké napětí

1. ÚVOD

Elektrická energie patří v dnešní době k jedné z nejdůležitějších komodit využívaných v průmyslu a obchodě. Jelikož ji nelze ve velkém měřítku akumulovat, nelze tudíž ani před použitím prověřovat její kvalitu, a proto je dodávána přímo do výrobního procesu v patřičném okamžiku a na patřičném místě důvěryhodným a osvědčeným dodavatelem, aniž by bylo potřeba ji kontrolovat. Má-li být tento přístup úspěšný, je nutné, aby byly správně formulovány požadavky na její jednotlivé složky (parametry), aby dodavatel byl schopen složky vyrobit a dodat podle požadavků a včas, a aby výrobce měl představu o závislosti celého výrobního procesu na jednotlivých složkách. [6]

Obecně kvalita elektrické energie nezávisí čistě na výrobci elektrické energie, neboť určité kvalitativní parametry ovlivňuje nejen výroba a distribuce elektrické energie, ale v čím dál větší míře i způsob její spotřeby. Z tohoto důvodu jsou kladeny požadavky, jak na dodavatele, tak na odběratele, aby v předávacím místě elektrické energie byly dodrženy její kvalitativní parametry v určitých normovaných mezích.

S pojmem „kvalita elektrické energie“ úzce souvisí i kompenzace účinníku neboli kompenzace jalového výkonu. Problematika kompenzace jalového výkonu je v naší technické veřejnosti podrobněji diskutována zhruba od začátku 70 let, kdy začalo zohledňování účinníku odběru elektrické energie v její ceně. Od té doby byly v průmyslových, ale i distribučních sítích v naší republice nainstalovány stovky megawattů kompenzačního výkonu na různých napěťových hladinách. Dnes je nutné pohlížet na problém kompenzace jalového výkonu poněkud pod jiným zorným úhlem, zejména z následujících důvodů: [3]

- Technická životnost původních zařízení je u konce.
- Změnil se přístup distributorů elektrické energie k hodnocení a zpoplatňování jejího odběru.
- Charakteristiky současných průmyslových sítí jsou poněkud odlišné od sítí v sedmdesátých letech.
- Ve skladbě spotřebičů elektrické energie jsou zastoupeny stále více spotřebiče nelineární – generující do sítě energetické rušení.
- Začínají se do technické praxe uvádět normy a technická doporučení popisující kvalitu elektrické energie, na níž mají kompenzační zařízení mnohdy zásadní vliv.

Právě vliv kompenzačního zařízení na kvalitu elektrické energie je podstatným faktorem při jeho návrhu. Instalací kompenzačního zařízení můžeme určité parametry kvality elektrické energie zlepšit, ale naopak při špatném návrhu také zhoršit. Kompenzační zařízení by tedy mělo být navrženo tak, aby dané parametry kvality elektřiny v předávacím místě elektrické energie nevhodným způsobem neovlivňovalo.

2. CÍL PRÁCE

Cíle práce, kterých má být dosaženo, jsou obecně shrnuty v zadání diplomové práce.

Hlavním cílem práce je náhrada rotačních synchronních generátorů v daném petrochemickém podniku statickou kompenzací, jako zakázka firmy Kompel. Nutno je tedy posoudit možnost využití stávajících kompenzací podniku, provést kompletní návrh nového kompenzačního zařízení a ověřit správnou funkčnost kompenzačních zařízení simulacemi.

3. KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jak již bylo naznačeno v úvodní části této práce, elektrická energie musí splňovat určitá kritéria, aby byla dodržena její kvalita. Kvalita elektrické energie je tvořena:

1. Kvalitou dodávky – tím je myšlená spolehlivost či nepřetržitost její dodávky
2. Kvalitou napětí při dodávce proudu

3.1 KVALITA NAPĚTÍ

Kvalita napětí vychází z ideálního průběhu, který je definován harmonickým průběhem s nominální frekvencí f_n a nominální či smlouvenou a časově neměnnou velikostí napětí $U_{m,n}$. Z pohledu třífázové soustavy musí být ještě splněna podmínka symetričnosti napětí.[7]

$$u(t) = U_{m,n} \sin(2\pi f_n t) \quad t \in (-\infty; \infty) \quad (2.1)$$

Kvalita elektrické energie nezávisí pouze na dodavateli elektrické energie, neboť průběh napětí v napájecí síti je výsledkem vzájemného působení její výroby a spotřeby prostřednictvím elektrické sítě.

Ideální parametry napětí mohou být v jednotlivých uzlech elektrické soustavy zajištěny jen za určitých podmínek, které ale nemohou být v reálném světě splněny. Předpoklad totiž vychází z ideálního chování jednotlivých prvků elektrizační soustavy od výroby po její spotřebu. Výsledkem jednotlivých prvků soustavy, tvořící nelineární, frekvenčně a časově proměnný a nehomogenní systém, je pak nutně nahodilý charakter napětí v síti, spojený s rušivými jevy šířenými po vedení. [7]

Jako globální parametr napětí označujeme jeho frekvenci, neboť ta se mění pouze s časem. Ostatní parametry napětí, jako je velikost či míra jeho deformace, se mění i s místem a označujeme je jako parametry lokální.

3.1.1 CHARAKTERISTIKY NAPĚTÍ

Kvalita napětí je definována charakteristikami napětí vycházejících z kompatibilních úrovní rušení pro dané elektromagnetické prostředí, které jsou doplněny o statický rozměr dovolující překročení mezí jednotlivých parametrů napětí po určité procento času. [7]

Charakteristiky napětí v předávacím místě elektrické energie mezi dodavatelem a odběratelem jsou definovány normou ČSN EN 50160 a jsou to:

1. Kmitočet sítě
2. Velikost napájecího napětí
3. Odchylny napájecího napětí
4. Rychlé změny napětí
 - Velikost rychlých změn napětí
 - Míra vjemu flikru
5. Krátkodobé poklesy napájecího napětí
6. Nesymetrie napájecího napětí
7. Harmonická napětí
8. Meziharmonická napětí

9. Úrovně napětí signálů v napájecím napětí
10. Krátkodobá přerušení napájecího napětí
11. Dlouhodobá přerušení napájecího napětí
12. Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
13. Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí

Podrobnější pojednání o charakteristikách napětí je např. v [26].

4. VÝKON VE STŘÍDAVÝCH OBVODECH

Okamžitý elektrický výkon ve střídavých soustavách lze obecně definovat jako součin okamžitých hodnot napětí a proudu [1]

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (4.1)$$

Pokud jsou průběhy proudu a napětí periodické se stejnou periodou, je činný výkon dán střední hodnotou okamžitého výkonu za periodu T . Je to průměrný výkon během jedné periody

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt. \quad (4.2)$$

4.1 HARMONICKÁ NAPĚTÍ A PROUDY

Pro určení výkonu v obvodech harmonického ustáleného stavu předpokládáme pro jednoduchost fázový úhel napětí $\Psi_u = 0$, tedy $\Psi_i = -\varphi$. Poté můžeme psát pro okamžitou hodnotu napětí

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (4.3)$$

a pro okamžitou hodnotu proudu

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi). \quad (4.4)$$

Po dosazení do vztahu (4.1), pro okamžitý výkon, za okamžité hodnoty napětí a proudu a při použití vztahu $\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$ dostáváme

$$p(t) = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]. \quad (4.5)$$

Nahradíme-li maximální hodnoty napětí a proudu efektivními hodnotami

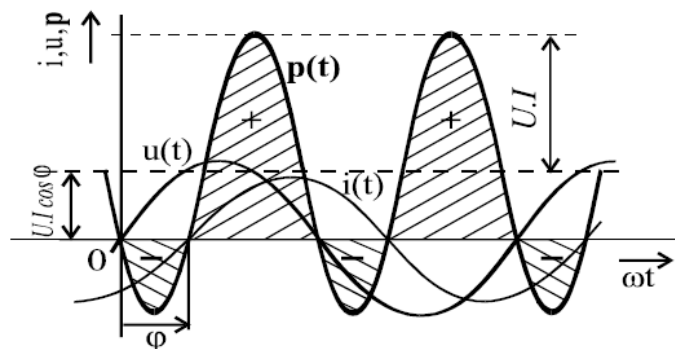
$$p(t) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi). \quad (4.6)$$

Rovnice (4.6) nám vyjadřuje, že okamžitý výkon je dán superpozicí dvou členů. První člen je stálou složkou výkonu, druhý člen je složkou kmitavou, kmitající s dvojnásobným kmitočtem.

Na Obr. 4.1 jsou vyneseny průběhy pro okamžitý výkon, napětí a proud pro $\varphi > 0$. Z obrázku je zřetelné, že tam, kde v intervalu mají hodnoty průběhu napětí a proudu stejné znaménko, je okamžitý výkon kladný, kde mají znaménko opačné, je okamžitý výkon záporný.

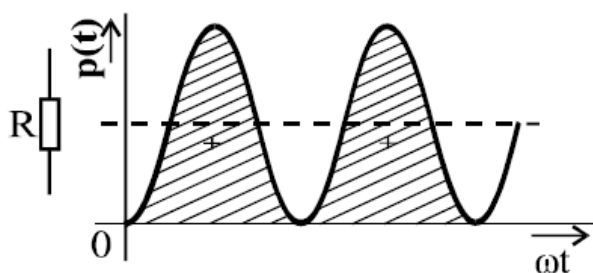
Při fázovém posunu mezi napětím a proudem $\varphi = 0$ (rezistor) plyne z rovnice (4.6), že stálá složka okamžitého výkonu je rovna amplitudě kmitavé složky a okamžitý výkon je stále kladný (Obr. 4.2). Rezistor tedy v každém okamžiku odebírá výkon z vnějšího obvodu (ze sítě). Hovoříme o výkonu činném, který koná užitečnou práci. Je-li fázový posun $\varphi = \pm \pi/2$

(ideální cívka, ideální kondenzátor), je stálá složka okamžitého výkonu rovna nule a okamžitý výkon je určen pouze složkou kmitavou.

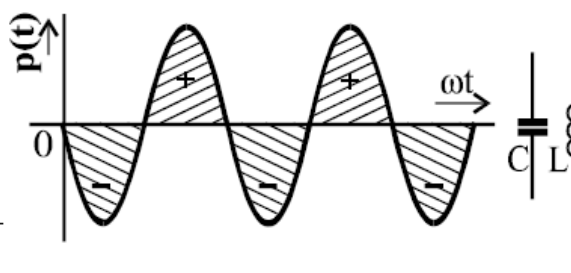


Obr. 4.1: Průběh okamžitého výkonu [1]

Výkon se pouze přelévá ze zdroje ke spotřebiči a naopak, nespotřebovává se (Obr. 4.3). V tomto případě hovoříme o výkonu jalovém, který práci nekoná. Jelikož se jalový výkon pouze přelévá z místa přebytku do místa nedostatku, nazývá se též jako výkon flukтуаční a slouží především k vytváření elektromagnetických polí. [11]



Obr. 4.2: Okamžitý výkon (rezistor)[1]



Obr. 4.3: Okamžitý výkon (induktor, kapacitor)[1]

Ve stejnosměrných obvodech je výkon definován jako součin napětí a proudu a byl označován písmenem P . K němu ekvivalentním výkonem v obvodech se střídavými proudy, je výkon činný. Jalový výkon v popisu výkonu ve stejnosměrných obvodech nevystupuje.

Činný výkon je definován jako střední hodnota okamžitého výkonu za dobu periody (4.2). Dosazením rovnice (4.6) za okamžitý výkon v rovnici (4.2) dostáváme pro činný výkon

$$P = UI \cos \varphi, \quad (4.7)$$

který se udává ve wattch [W] a jehož velikost závisí nejen na velikosti napětí a proudu ale i na $\cos \varphi$, který se nazývá účinníkem

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} \quad (4.8)$$

Pro jalový výkon platí rovnice [1]

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (4.9)$$

Mezinárodní dohodou o definici elektrického výkonu v roce 1930, pro odlišení charakteru jalového výkonu (nekoná práci) od výkonu činného (koná práci), byl za jeho jednotku zvolen

voltampér reaktanční [VAr]. Jelikož v obvodě s obecnou RLC zátěží existuje disproporce mezi velikostí zdánlivého a činného výkonu, z tohoto důvodu Budeanu zavedl vztah pro veličinu označovanou jako jalový výkon. Tento vztah pro „neužitečný“ jalový výkon postrádá jakýkoliv fyzikální význam a nevyplývá z rozboru okamžitého výkonu. [30]

Dalším výkonovým parametrem je zdánlivý výkon definovaný vztahem

$$S = UI, \quad (4.10)$$

který se udává ve voltampérech [VA] a charakterizuje výkonové možnosti energetických zařízení (např. generátorů, motorů, transformátorů). Ta jsou navrhována na určitý jmenovitý proud a napětí. Jak lze vidět při srovnání se vztahy (4.7) a (4.9), pro činný a jalový výkon, je zdánlivý výkon jejich maximální možnou hodnotou při daných hodnotách napětí a proudu.

Při vyjádření harmonických veličin proudů a napětí pomocí fázorů, můžeme vyjádřit výkony jako komplexní čísla. Pro fázor napětí můžeme psát

$$\bar{U} = Ue^{j\psi_u}. \quad (4.11)$$

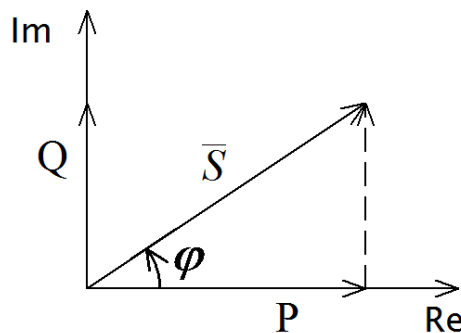
Pro fázor proudu platí

$$\bar{I} = Ie^{j\psi_i} \quad (4.12)$$

Pak označíme jako komplexní výkon následující součin[1]

$$\bar{S} = \bar{U}\bar{I}^* = Ue^{j\psi_u} \cdot Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = UIe^{j\varphi} = UI[\cos \varphi + j \sin \varphi] = P + jQ. \quad (4.13)$$

V tomto vztahu vystupuje komplexně sdružený fázor proudu $\bar{I} = I \cdot e^{-j\psi_i}$ proto, aby ve výpočtu fázový posun odpovídal zavedené definici (rozdílu počáteční fáze napětí a proudu $\psi_u - \psi_i = \varphi$). Ze vztahu (4.13) plyne, že činný výkon P je reálná část, jalový výkon Q je imaginární část a zdánlivý výkon S je modul komplexního výkonu.



Obr. 4.4: Fázor komplexního výkonu

Pro zdánlivý výkon můžeme pak psát

$$S^2 = P^2 + Q^2; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.14)$$

Účinník pak můžeme určit ze vztahu

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (4.15)$$

4.2 NEHARMONICKÁ NAPĚTÍ A PROUDY

Průběhy periodických neharmonických napětí a proudů můžeme rozložit do Fourierových řad. Jejich následné vyjádření pak bude

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{\max n} \sin(n\omega t + \psi_n) \quad (4.16)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{\max n} \sin(n\omega t + \psi_n). \quad (4.17)$$

Dosadíme-li tyto vztahy do rovnice pro činný výkon, dostáváme po úpravách vztah [2]

$$P = I_0 U_0 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} U_{\max n} I_{\max n} \cos \varphi_n = I_0 U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (4.18)$$

Z předcházejícího vztahu plyne, že činný výkon mohou vytvářet jen harmonické složky napětí a proudu téhož řádu.

Efektivní hodnota napětí a proudu je odvozena z představy lineární impedance připojené na obecné periodické napětí. Fyzikálně je efektivní hodnota proudu konstantní (stejnoseměrná) hodnota proudu, který by vyvinul stejné množství tepla jako časově proměnný proud $i(t)$ za dobu jedné periody na konstantní odporové zátěži. Uvažujme jako lineární zátěž rezistor o odporu R . Jelikož pro lineární zátěž platí Ohmův zákon, můžeme v rovnici (4.18) nahradit $I_0 = U_0/R$ a $I_n = U_n/R$ a současně také platí, že $\cos \varphi = 1$.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T R i^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt = R I_{ef}^2 = \frac{U_{ef}^2}{R} \quad (4.19)$$

Stejně tak můžeme položit poslední a předposlední člen rovnice do rovnosti s rovnicí (4.18)

$$P = I_0^2 R + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 R = \frac{U_0^2}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{R} = R I_{ef}^2 = \frac{U_{ef}^2}{R} \quad (4.20)$$

Z rovnic (4.19) a (4.20) poté plynou vztahy pro efektivní hodnoty proudu a napětí vyjádřené jak v integrálním tvaru, tak i jako součet jednotlivých harmonických složek

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} \quad (4.21)$$

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \quad (4.22)$$

Uvedené rovnice jsou univerzální a představují výpočet efektivních hodnot napětí a proudu pro obecný tvar periodického průběhu.

Jelikož efektivní hodnota, jako srovnávací parametr mající vztah k činnému výkonu je vázána na lineární impedanci, je vazba efektivních hodnot na výkon zavádějící. Jednoznačně lze činný výkon určit pouze ze vztahu (4.2). Nemůžeme ho stanovit ze vztahu (4.7) pro neharmonická napětí či proudy.

Protože ve střídavých sítích se nesmí vyskytovat napětí či proud obsahující stejnosměrnou složku, bývají většinou v literatuře uváděny vztahy pro efektivní hodnoty bez stejnosměrné složky

$$I_{ef} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (4.23)$$

$$U_{ef} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (4.24)$$

Vydeme-li z definice zdánlivého výkonu (4.10)

$$S = U_{ef} I_{ef} \quad (4.25)$$

můžeme určit účinník, který nám definuje využití celkového výkonu (zdánlivého výkonu, který je potřebný dodat danému zařízení pro jeho správnou funkci) na užitečnou práci (činný výkon). Proto se účinník označuje také jako faktor výkonu z anglického power factor (PF).

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T Ri^2(t) dt}{U_{ef} I_{ef}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 I_n^2}} \quad (4.26)$$

Účinník λ se obecně nerovná účinníku $\cos \varphi$ definovaném v soustavách s harmonickými proudy a napětími a u neharmonických proudů a napětí nemůže být definován jako kosinus úhlu mezi napětím a proudem. Pro odlišení se nazývá opravdový účinník (true power factor). V technické praxi se setkáváme většinou s tím, že spotřebič představující nelineární zátěž je napájen harmonickým napětím. Nelineární zátěž tedy způsobí zkreslení průběhu proudu. Napětí v síti zůstává harmonické. Pak dostáváme pro definici opravdového účinníku vztah

$$\lambda = \frac{U I_1 \cos \varphi_1}{U_{ef} I_{ef}} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cdot \cos \varphi_1 = g_I \cdot \cos \varphi_1, \quad (4.27)$$

kde g_I se nazývá činitel deformace proudu, který nabývá hodnoty 1 pro čistě harmonické průběhy a pro ostatní bude nabývat hodnot v intervalu mezi 0 a 1. Kosinus fázového posunu φ_1 mezi napájecím napětím a první harmonickou proudem $\cos \varphi_1$ se označuje jako činitel posunutí (displacement power factor). Lze ho definovat jako poměr činného výkonu 1. harmonických složek napětí a proudu k zdánlivému výkonu těchto složek.

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (4.28)$$

Pro zpřesnění definice zdánlivého výkonu v prostředí s neharmonickými proudy ho umocníme na druhou (napětí považujeme, jak bylo řečeno výše za harmonické, což lze v praxi považovat za reálné). V elektrické síti by se neměla objevit stejnosměrná složka proudu, ale obecně se vlivem nelinearity zátěže může objevit.

$$S^2 = U_{ef}^2 \left(\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \right)^2 = U_{ef}^2 I_1^2 + U_{ef}^2 \left(I_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right) = S_1^2 + P_{def}^2 = P_1^2 + Q_1^2 + P_{def}^2 \quad (4.29)$$

$$P_{def}^2 = S^2 - P_1^2 - Q_1^2 \quad (4.30)$$

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + P_{def}^2} \quad (4.31)$$

Tento vztah (4.30) navržený Emanuele ([9] str. 158) je výstižný vzhledem k porovnání se zdánlivým výkonem u harmonických průběhů napětí a proudu, neboť ukazuje, že zdánlivý výkon v oblastech s výskytem neharmonických proudů není pouze vektorovým součtem činného a jalového výkonu, jako u harmonických proudů, ale ještě další složky tzv. deformačního výkonu P_{def} . V anglicky psané literatuře se nazývá jako doplňkový výkon P_c (complementary power, Budeanu označil jako doplňkový výkon vektorový součet jalové a deformační složky výkonu [9] str. 156) nebo jako deformační (zkreslený, pokřivený) výkon D (distortion power).

Pro harmonické napětí poté můžeme psát

$$P = P_1 = UI_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad Q = Q_1 = UI_1 \cdot \sin \varphi_1, \quad S = S_1 = UI_1 = U \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}, \quad (4.32-4.34)$$

Pokud tedy napětí a proud obsahují pouze základní frekvenci, tedy jsou harmonické, je účinník $\cos \varphi_1$ stejný jako opravdový účinník λ i jako klasický účinník $\cos \varphi$.

Většinou se v literatuře setkáváme s nejrozšířenějším vztahem pro zdánlivý výkon vycházející z Budeanovy teorie, která je obecně přijatá IEC i IEEE. [8] [9]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (4.35)$$

kde platí:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (4.36)$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (4.37)$$

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2, \quad (4.38)$$

a tudíž se v tomto případě počítá i s výskytem neharmonického napětí a D se nazývá deformační výkon. Budeanu navrhl vztah (4.36) pro výpočet jalového výkonu v soustavách s neharmonickými proudy a napětími (neuvažuje se stejnosměrná složka).

Další vztah odvozený pro výpočet jalového výkonu s neharmonickými napětími a proudy navrhl Fryze, který rozdělil proud zátěže do dvou ortogonálních složek na činný (active) proud i_a a jalový (reactive) proud i_b

$$i(t) = i_a(t) + i_b(t) \quad (4.39)$$

a jalový výkon se vypočítá ze vztahu

$$Q_F = UI_b = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (4.40)$$

Byly odvozeny další vztahy určující jalový nebo zdánlivý výkon v soustavách s neharmonickými proudy i napětími, které více méně vycházejí z těchto dvou teorií (Budeanu, Fryze). Tyto dvě teorie popisující výkonové vlastnosti jednofázové zátěže v obvodech s neharmonickými proudy a napětími jsou chybné nebo nejednoznačné, pro některé typy zátěží. Demonstrace chybných závěrů, které plynou z Budeanovy teorie a stejně tak z definice jalového výkonu podle Fryze (4.39) jsou shrnuty v práci Czarneckého [14]. Tedy Budeanova teorie je v těchto obvodech nevhodná pro praktické aplikace, zejména za účelem zlepšení účinníku. Jalový výkon definovaný Budeanem nemůže být použit pro výpočet účinníku a tedy ani pro návrh kompenzačního zařízení. Stejně tak i deformační výkon nepopisuje věrně výkonové vlastnosti zátěže. Podobně je tomu i s Fryzovou definicí jalového výkonu, která neposkytuje žádný základ pro návrh kompenzace. Czarnecki navrhl teorii proudových fyzikálních složek (current's physical components - CPC) pro popis výkonu v obvodech s výskytem neharmonických proudů a napětí, která dává jasný základ pro návrh kompenzace (množství dodávaného jalového výkonu).

Nutno zmínit, že vše, co bylo dosud napsáno, platí pouze pro jednofázové obvody. Problematika určení zdánlivého výkonu v třífázových soustavách bude nastíněna v kapitole 4. 2. 1

4. 2. 1 TEORIE PROUDOVÝCH FYZIKÁLNÍCH SLOŽEK – CPC

A) Jednofázové obvody

Úpravou rovnic (4.16) a (4.17), tedy převedením reálné funkce sinus do komplexní roviny a vyjádření velikosti jednotlivých harmonických pomocí efektivní hodnoty, můžeme napětí a proudy vyjádřit jako

$$u(t) = U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Im} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{U}_n e^{jn\omega t} \quad (4.41)$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \operatorname{Im} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{I}_n e^{jn\omega t}. \quad (4.42)$$

Czarnecki [14] navrhl proud i vstupující do zátěže rozdělit do třech ortogonálních složek

$$i(t) = i_a(t) + i_s(t) + i_r(t), \quad (4.43)$$

kde i_a je činný proud (active current) ekvivalentní odporové zátěže G_e , i_s se nazývá rozptýlený proud (scattered current), i_r je jalový proud (reactive current). Pro jednotlivé složky proudy platí vztahy

$$i_a(t) = G_e u(t) = \sqrt{2} \operatorname{Im} \sum_{n=0}^{\infty} G_e \bar{U}_n e^{jn\omega t} \quad (4.44)$$

$$i_s(t) = (G_0 - G_e) U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Im} \sum_{n=1}^{\infty} (G_n - G_e) \bar{U}_n e^{jn\omega t} \quad (4.45)$$

$$i_r(t) = \sqrt{2} \operatorname{Im} \sum_{n=1}^{\infty} jB_n \bar{U}_n e^{jn\omega t} \quad (4.46)$$

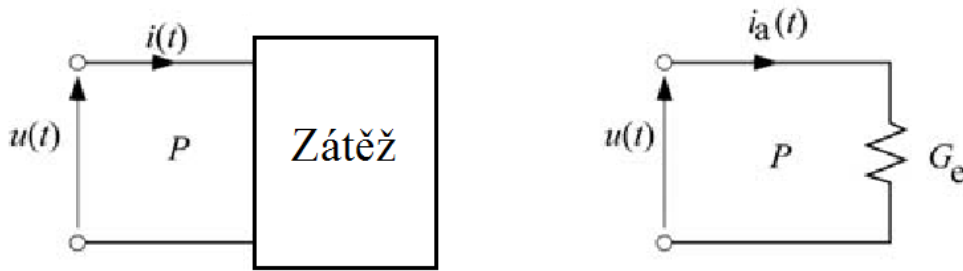
$$I_a = G_e U = \frac{P}{U} \quad (4.47)$$

$$I_s = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (G_n - G_e)^2 U_n^2} \quad (4.48)$$

$$I_r = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 U_n^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{Q_n}{U_n} \right)^2}, \quad (4.49)$$

kde G_e je vodivost zátěže, která je ekvivalentní ke skutečné zátěži z hlediska přeměny energie na činný výkon (Obr. 4.5), G_n je vodivost skutečné zátěže pro n -tou harmonickou, B_n je susceptance skutečné zátěže pro n -tou harmonickou a Q_n je jalový výkon n -tých harmonických napětí a proudů, pro který platí

$$Q_n = U_n I_n \sin \varphi_n = -B_n U_n^2. \quad (4.50)$$



Obr. 4.5: Obecná zátěž a její ekvivalentní odporová zátěž se stejným činným výkonem P [15]

Pro efektivní hodnotu proudu zátěže poté platí vztah

$$I^2 = I_a^2 + I_s^2 + I_r^2; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_s^2 + I_r^2}. \quad (4.51)$$

Pro výkonovou rovnici (zdánlivý výkon) můžeme psát obdobně

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q^2; \quad S = \sqrt{P^2 + D_s^2 + Q^2}, \quad (4.52)$$

kde jednotlivé složky výkonu určíme ze vztahů

$$D_s = UI_s \quad \text{a} \quad Q = UI_r. \quad (4.53)$$

Pro opravdový účinník pak můžeme psát

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_s^2 + I_r^2}} \quad (4.54)$$

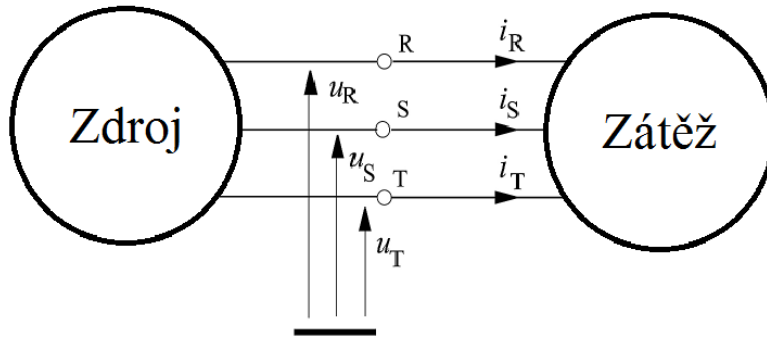
Jelikož např. stupňovitě spínané kondenzátory (hrazené nebo nehrazené) slouží ve většině případů pouze ke kompenzaci jalového výkonu a nefiltrují vyšší harmonické, tak při plné kompenzaci jalového výkonu nebude obecně opravdový účinník roven jedné, ale bude nabývat maxima daného vztahem

$$\lambda_{\max} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_s^2}}. \quad (4.55)$$

B) Třífázové obvody

Czarnecki ve své práci [15] shrnuje, že rovnice (4.14) platí pouze v třífázových soustavách s harmonickými napětími a proudy, pokud je zátěž symetrická. Účinník tedy i v případě čistě odporové, ale nesymetrické zátěže nebude roven jedné. Také je zde ukázáno, že pro nesymetrickou zátěž je možno určit zdánlivý výkon pouze z rovnice (4.56) a pro činný a jalový výkon platí rovnice (4.57) a (4.58)

$$S = \sqrt{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2} \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2} \quad (4.56)$$



Obr. 4.5: Třífázový systém[15]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T) dt = \sum_{f=R,S,T} U_f I_f \cos \varphi_f \quad (4.57)$$

$$Q = \sum_{f=R,S,T} U_f I_f \sin \varphi_f \quad (4.58)$$

Jelikož se nacházíme v třífázových soustavách, je vhodné uspořádat fázová napětí a proudy do vektorů

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_R(t) \\ x_S(t) \\ x_T(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \operatorname{Im} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{X}_{R,n} e^{jn\omega t} \\ \sum_{n=1}^{\infty} \bar{X}_{S,n} e^{jn\omega t} \\ \sum_{n=1}^{\infty} \bar{X}_{T,n} e^{jn\omega t} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{x}_n = \sqrt{2} \operatorname{Im} \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{X}_n e^{jn\omega t}, \quad (4.59)$$

kde pro efektivní hodnotu třífázového vektoru napětí nebo proudu \mathbf{x} platí

$$\|\mathbf{x}\| = \sqrt{X_R^2 + X_S^2 + X_T^2} \quad (4.60)$$

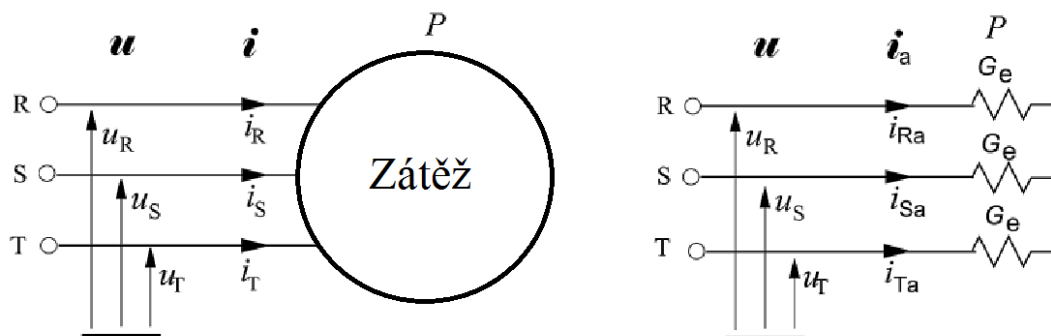
a X_R, X_S, X_T jsou obecně efektivní hodnoty jednotlivých fázových napětí nebo proudů.

Nyní můžeme nadefinovat zdánlivý výkon jako

$$S = \|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{i}\| \quad (4.61)$$

Rovnice (4.61) je ekvivalentní rovnici (4.56). Přesvědčit se o tom můžeme dosazením za jednotlivé efektivní hodnoty vektorů napětí a proudu dle obecného vztahu (4.60). Rovnice (4.61) ukazuje, jak lze nahradit třífázové efektivní hodnoty napětí nebo proudů jednou efektivní hodnotou třífázového vektoru napětí nebo proudu.

Pro pochopení významu jednotlivých symbolů v rovnicích, sloužících k výpočtu jednotlivých proudových fyzikálních složek, je potřeba vysvětlit pojem ekvivalentní vodivost G_e (obdobně jako u jednofázových soustav) a ekvivalentní admitance Y_e .



Obr. 4.6: Obecná zátěž a její ekvivalentní odporová zátěž se stejným činným výkonem P [15]

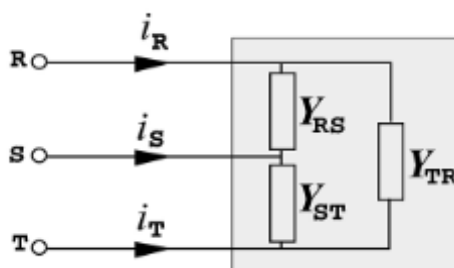
Ekvivalentní vodivost G_e třífázové zátěže je taková vodivost (Obr. 4.6), která respektuje, jaké množství elektrické energie se přemění na činný výkon ve skutečné zátěži

$$P = U_R^2 G_e + U_S^2 G_e + U_T^2 G_e \quad (4.62)$$

$$G_e = \frac{P}{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2} = \frac{P}{\|\mathbf{u}\|^2} \quad (4.63)$$

a pro n -tou harmonickou

$$G_{en} = \frac{P_n}{\|\mathbf{u}_n\|^2}. \quad (4.64)$$



Obr. 4.7: Ekvivalentní zátěž ke skutečné zátěži na Obr. 4.6 vlevo [15]

Definice ekvivalentní admitance k třífázové zátěži (Obr. 4.7)

$$\bar{Y}_e = G_e + jB_e = \bar{Y}_{RS} + \bar{Y}_{ST} + \bar{Y}_{TR}. \quad (4.65)$$

Obdobně můžeme psát pro ekvivalentní admitanci n -té harmonické

$$\bar{Y}_{en} = G_{en} + jB_{en} = \bar{Y}_{RSn} + \bar{Y}_{STn} + \bar{Y}_{TRn} \quad (4.66)$$

Při odvozování vztahů pro jednotlivé proudové fyzikální složky se zavádí pojem nesymetrická admitance, která poté vystupuje ve vztahu pro výpočet jedné z proudových fyzikálních složek (nesymetrická složka proudu)

$$\bar{A} = -(\bar{Y}_{RS} + \bar{a}\bar{Y}_{ST} + \bar{a}^2\bar{Y}_{TR}). \quad (4.67)$$

Při výskytu neharmonických napětí a proudů závisí nesymetrická admitance n -té harmonické \bar{A}_n na řadě harmonických napětí. Pro harmonické reprezentované v souměrných složkách jako sousledné složky, tedy pro řady $n = 3k + 1$

$$\bar{A}_n = -(\bar{Y}_{STn} + \bar{a}\bar{Y}_{TRn} + \bar{a}^2\bar{Y}_{RSn}) \quad (4.68)$$

a pro harmonické reprezentované v souměrných složkách jako zpětné složky, tedy pro řady $n = 3k - 1$

$$\bar{A}_n = -(\bar{Y}_{STn} + \bar{a}^2\bar{Y}_{TRn} + \bar{a}\bar{Y}_{RSn}). \quad (4.69)$$

Jelikož v našem případě popisujeme zátěž bez vyvedeného středního vodiče, harmonické složky reprezentované v souměrných složkách jako nulové složky (řady $n = 3k$) zde nebudou přítomny.

Czarnecki rozkládá fázové proudy třífázové zátěže v obvodech s výskytem neharmonických proudů a napětí do čtyř fyzikálních složek

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_r + \mathbf{i}_u, \quad (4.70)$$

kde \mathbf{i}_a je činný proud, \mathbf{i}_s rozptýlený proud, \mathbf{i}_r jalový proud (obdobně jako v jednofázových obvodech) a \mathbf{i}_u je nesymetrický proud (unbalanced current) způsobující proudovou nesymetrii. Všechny tyto proudy jsou třífázové vektory, nahrazující fázové proudy třífázové zátěže a pro jejich efektivní hodnoty platí následující vztahy

$$\|\mathbf{i}_a\| = G_e \|\mathbf{u}\| \quad (4.71)$$

$$\|\mathbf{i}_s\| = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (G_{en} - G_e)^2 \|\mathbf{u}_n\|^2} \quad (4.72)$$

$$\|\mathbf{i}_r\| = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} B_{en}^2 \|\mathbf{u}_n\|^2} \quad (4.73)$$

$$\|\mathbf{i}_u\| = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 \|\mathbf{u}_n\|^2}. \quad (4.74)$$

Pro efektivní hodnoty proudu zátěže (třífázový vektor proudů) a jeho fyzikální proudové složky (třífázové vektory proudů) poté platí vztah

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \|\mathbf{i}_a\|^2 + \|\mathbf{i}_s\|^2 + \|\mathbf{i}_r\|^2 + \|\mathbf{i}_u\|^2. \quad (4.75)$$

Obdobně udávají proudové složky vztah pro výpočet zdánlivého výkonu

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q^2 + D^2, \quad (4.76)$$

kde

$$P = G_e \|\mathbf{u}\|^2 = \|\mathbf{i}_a\| \cdot \|\mathbf{u}\| \quad (4.77)$$

$$D_s = \|\mathbf{i}_s\| \cdot \|\mathbf{u}\| \quad (4.78)$$

$$Q = \|\mathbf{i}_r\| \cdot \|\mathbf{u}\| \quad (4.79)$$

$$D = \|\mathbf{i}_u\| \cdot \|\mathbf{u}\|. \quad (4.80)$$

Opravný účinník se určí ze vztahu

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D_s^2 + D^2}} = \frac{\|\mathbf{i}_a\|}{\sqrt{\|\mathbf{i}_a\|^2 + \|\mathbf{i}_r\|^2 + \|\mathbf{i}_s\|^2 + \|\mathbf{i}_u\|^2}} \quad (4.81)$$

Rovnice (4.70-4.80) umožňují výpočet jednotlivých složek zdánlivého výkonu a tím i výpočet jalového výkonu k návrhu kompenzačního zařízení v třífázových soustavách s neharmonickými napětími i proudy i v případě nesymetrické zátěže. V případě nesymetrické zátěže vyskytující se v harmonickém prostředí (sinusové proudy i napětí) se vztahy zjednoduší

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_r + \mathbf{i}_u \quad (4.82)$$

$$\|\mathbf{i}_a\| = G_e \|\mathbf{u}\| \quad (4.83)$$

$$\|\mathbf{i}_s\| = B_e \|\mathbf{u}\| \quad (4.84)$$

$$\|\mathbf{i}_u\| = A \|\mathbf{u}\| \quad (4.85)$$

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \|\mathbf{i}_a\|^2 + \|\mathbf{i}_r\|^2 + \|\mathbf{i}_u\|^2 \quad (4.86)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (4.87)$$

$$Q = \|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{i}_r\| = -B_e \|\mathbf{u}\|^2 \quad (4.88)$$

$$D = \|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{i}_u\| = A \|\mathbf{u}\|^2 \quad (4.89)$$

Pro opravný účinník můžeme psát

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{\|\mathbf{i}_a\|}{\sqrt{\|\mathbf{i}_a\|^2 + \|\mathbf{i}_r\|^2 + \|\mathbf{i}_u\|^2}} = \frac{G_e}{\sqrt{G_e^2 + B_e^2 + A^2}} \quad (4.90)$$

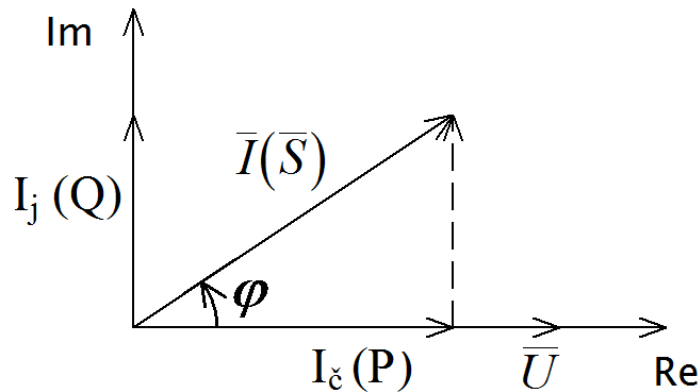
Ve vztazích pro výpočet jednotlivých proudových složek (4.71-4.74) nebylo počítáno s výskytem stejnosměrné složky, na rozdíl od vztahů pro jednofázové obvody (4.47-4.49), ve kterých je zahrnuta i stejnosměrná složka.

5. KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU

5.1 ÚVOD DO KOMPENZACE

Většina spotřebičů a elektroenergetických zařízení potřebuje ke své funkci vedle činného i jalový výkon na vytvoření magnetického pole ve svém obvodu (transformátory, asynchronní motory, indukční a vysokofrekvenční pece, apod.), případně k posunu základní harmonické proudu vůči napětí při zpožděném spínání tyristorů u fázově řízených usměrňovačů (zmíněný jalový výkon se nazývá řídicí jalový výkon, neboť je způsobený řízením usměrňovače a je doprovodným jevem podstaty činnosti usměrňovačů s fázovým řízením[5]).

Jalová složka proudu I_j potřebná k vytvoření magnetického pole je zpožděna za fázovým napětím \bar{U} o $\pi/2$ rad. Její vektorový součet s činnou složkou proudu I_ϵ dává celkový (zdánlivý) proud, který musí být dodán spotřebičům (Obr. 5.1).



Obr. 5.1: Fázorový diagram

Rozvodné zařízení je proto zatěžováno větším proudem než odpovídá přenosu pouze činného výkonu, což má tyto důsledky[4]:

1. Ztráty výkonu a úbytek napětí jsou větší. Neboť platí známé vztahy pro trojfázové sítě VN a NN

$$\Delta P = 3 \cdot R I^2 = 3 \cdot R (I_\epsilon^2 + I_j^2) \quad (5.1)$$

$$\Delta U = U_1 - U_2 \cong R I_\epsilon \pm X I_j, \quad (5.2)$$

kde znaménko + platí pro induktivní zátěž a znaménko – pro kapacitní zátěž.

2. Snižuje se zatížitelnost zařízení činným výkonem. Mez zatížitelnosti je dána dovoleným oteplením a účínkem

$$I_{d\vartheta} \geq \frac{P_m}{\sqrt{3} \cdot U_n \cos \varphi_m}, \quad (5.3)$$

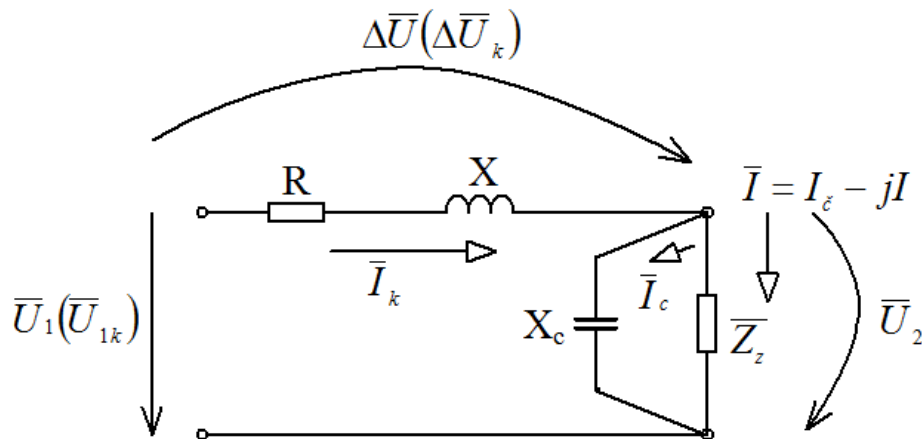
kde $I_{d\vartheta}$ je dovolené zatížení vodiče uloženého v prostředí o teplotě ϑ , U_n je jmenovité napětí, $\cos \varphi_m$ je účíník přenášeného výkonu P_m v ročním maximu.

Tím, že je rozvodné zařízení zatěžováno větším proudem, roste pořizovací cena elektrických zařízení a také se automaticky zhoršují zkratové poměry v síti.

Jak plyne z Obr. 5.1 účinník je mírou velikosti odebíraného jalového proudu I_j nebo jalového výkonu Q

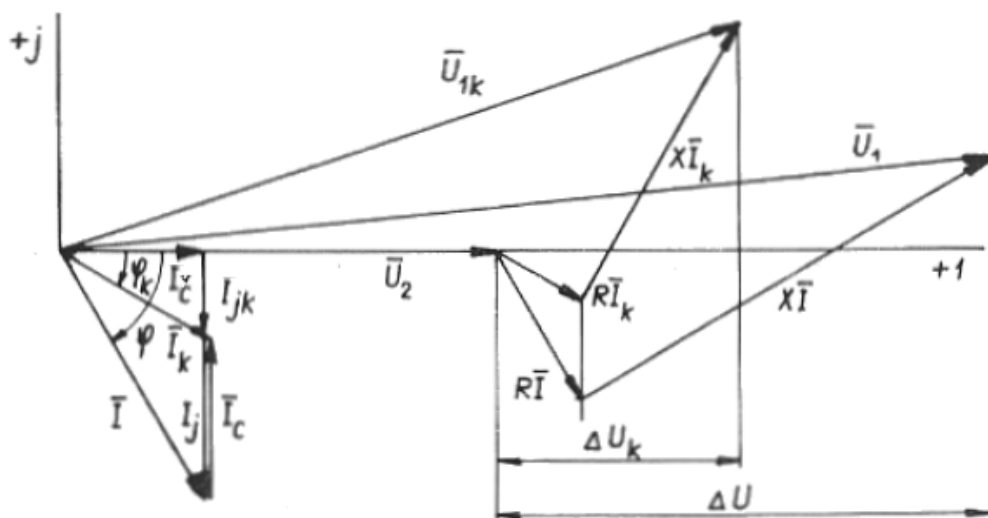
$$\cos \varphi = \frac{I_c}{I} = \frac{P}{S}. \quad (5.4)$$

Nepříznivý vliv jalové induktivní složky proudu je možno omezit dodávkou jalového výkonu v místě spotřeby např. připojením kondenzátoru ke svorkám spotřebiče jak ukazuje Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Paralelní kompenzace

Takováto výroba jalového výkonu v místě jeho spotřeby nebo v její blízkosti (u spotřebičů) a s tím spojené snížení dodávky jalové energie z elektráren se nazývá kompenzací jalového výkonu nebo kompenzací účinníku a jedná se o kompenzaci paralelní, neboť kompenzační zařízení je zapojeno paralelně ke svorkám spotřebiče.



Obr. 5.3: Fázorový diagram vedení s paralelní kompenzací [4]

Kompence jalového výkonu v místě spotřeby se tedy dosáhne: [3]

- Zvýšení schopnosti přenosu činného výkonu na úkor jalového výkonu ve vedení a v transformátorech a dále lepšího využití činného výkonu generátorů v elektrárnách
- Snížení ztrát ve vedeních a transformátorech
- Zlepšení napětí v sítích
- Odlehčení generátorů
- Oddálení investičních prostředků na nová zařízení rozvodné soustavy

Nutno zmínit, že kromě paralelní kompenzace se můžeme setkat ještě se sériovou kompenzací, při níž je kompenzační zařízení připojeno v sérii s napájecím vedením a jejímž cílem je zlepšení napěťových poměrů u vedení, které je zatěžováno odběrem s induktivní složkou výkonu. Sériová kompenzace neslouží ke kompenzaci jalového výkonu, ale ke kompenzaci induktivní reaktance vedení.

Paralelní kompenzací se mění charakteristické hodnoty spotřebičů (jejich požadavky na jalový výkon ze sítě) na rozdíl od sériové kompenzace, kterou se mění charakteristika (parametry) rozvodné soustavy.[4] Podrobněji je problematika sériové kompenzace rozebrána např. v [4] str. 89.

Jelikož se práce zabývá kompenzací jalového výkonu, bude tedy dále v textu pod pojmem kompenzace myšlena kompenzace paralelní.

5. 2 ROZDĚLENÍ KOMPENZACE (KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ)

5. 2. 1 PODLE UMÍSTĚNÍ KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

Podle umístění kompenzačního zařízení vzhledem ke spotřebiči můžeme rozdělit kompenzaci do 4 kategorií:

1) Jednotlivá (Individuální)

Jednotlivá kompenzace znamená, že každý spotřebič v síti je kompenzován individuálně. Výhodou je odlehčení od jalového výkonu celé sítě. Úspory ztrát jsou nejvyšší, avšak využití kompenzačního prostředku je závislé na provozu kompenzačního zařízení. Typickým příkladem může být kompenzace zářivkového svítidla, velkých indukčních motorů nebo transformátoru při chodu naprázdno.

2) Skupinová

Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnících rozváděče pro skupinu spotřebičů. Příkladem může být kompenzace na hlavních rozváděčích VN/NN v rozvodech průmyslových podniků. Vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon menší.

3) Ústřední (centrální) kompenzace

Kompenzační zařízení je připojeno na přípojnice vstupní trafostanice podniku. Vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů opět klesá potřebný kompenzační výkon

4) Smíšená

Smíšená kompenzace je kombinací předchozích variant a ve skutečnosti je variantou poměrně rozšířenou, především v rozsáhlých průmyslových sítích.

5. 2. 2 PODLE PRINCIPU ČINNOSTI

Podle principu činnosti můžeme kompenzační zařízení rozdělit do 3 skupin:

1) Rotační

Synchronní kompenzátor

2) Statické

Kondenzátor připojený přímo na síť, hrazený tlumivkou, kompenzační filtr

3) Polovodičové

Aktivní filtr

Jako statické kompenzátory bez ohledu na princip činnosti můžeme považovat, jak kompenzační zařízení, jejichž hlavním kompenzačním prvkem je kondenzátor (hrazená nebo nehrazená kompenzační zařízení, kompenzační (pasivní) filtr), tak i kompenzační zařízení, jejichž hlavním prvkem sloužícím ke kompenzaci je polovodičová součástka (aktivní filtr).

5. 2. 3 PODLE ZPŮSOBU REGULACE

Podle způsobu regulace můžeme rozlišit:

1) Kompenzátory s konstantním výkonem

Neregulované kondenzátorové baterie nebo kompenzační filtry spínané samostatným spínačem nebo společně s kompenzovaným spotřebičem

2) Kompenzátory se stupňovitou regulací

Samostatně spínané kondenzátorové stupně pomocí stykačů nebo bezkontaktních polovodičových spínačů na hladině NN na hladině VN spínané pomocí vakuových vypínačů nebo stykačů. Řízení sepnutí stykačů vypínačů či bezkontaktních spínačů se děje pomocí speciálních regulátorů jalového výkonu.

3) Kompenzátory s plynulou regulací

Synchronní kompenzátory, kondenzátorové baterie (hrazené, nehrazené) popřípadě kompenzační filtry doplněné paralelně připojenou dekompenzační fázově řízenou tlumivkou nebo aktivní filtry.

Bylo čerpáno především ze zdroje [32]

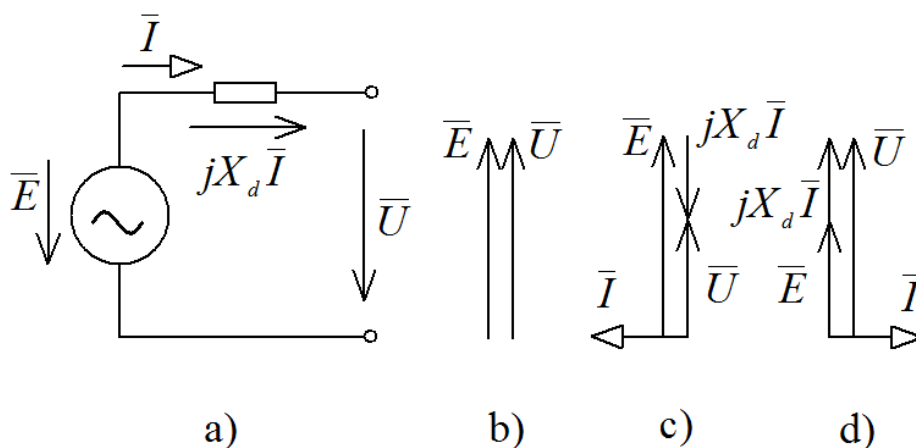
6. KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ V PRŮMYSLVÝCH SÍTÍCH NÍZKÉHO A VYSOKÉHO NAPĚTÍ

V této kapitole je shrnut přehled prostředků, které lze využít ke kompenzaci jalového výkonu na hladinách NN a VN. Kompenzační zařízení jsou zde rozdělena do dvou hlavních skupin.

6.1 ROTAČNÍ KOMPENZÁTORY

Základním kompenzačním prvkem je zde synchronní stroj (generátor) připojený paralelně k síti, ať už bez dodávky činného výkonu nebo dodávající do sítě činný výkon, kde změnou jeho buzení se řídí velikost dodávaného jalového výkonu do sítě.

Pro pochopení tvrzení, že budícím proudem řídíme velikost dodávaného jalového výkonu do sítě, je třeba přiblížit princip paralelní práce synchronního stroje se sítí. Pro rozbor spolupráce generátoru se sítí použijeme zjednodušené náhradní schéma Obr. 6.1a.



Obr. 6.1: K principu paralelní práce synchronního generátoru a) náhradní schéma, b), c), d) fázorové diagramy pro různé režimy práce

CHOD NAPRÁZDNO [10]

Generátor byl připojen v okamžiku, kdy indukované napětí \bar{E} se rovná napětí sítě \bar{U} . Proud generátoru \bar{I} je v tomto případě roven nule, a proto i zdánlivý výkon je nulový. Generátor pracuje naprázdno, tedy nedodává do sítě žádný elektrický výkon, ani činný ani jalový a z hnacího stroje (např. turbína) se odebírá mechanický příkon pouze na krytí vlastních ztrát naprázdno. Tomuto pracovnímu stavu odpovídá fázorový diagram na Obr. 6.1b.

CHOD S NULOVÝM ČINNÝM VÝKONEM [10]

Pro činný výkon synchronního generátoru platí vztah (4.7), z kterého plyne, že při konstantním napětí U může být činný výkon nulový, pouze když $I = 0$, anebo když $\varphi = \pi/2$, tedy při nulovém účinníku ($\cos\varphi = 0$). V tomto případě opět hnací stroj kryje pouze ztráty naprázdno, protože nedodává do sítě žádný činný výkon. Může však do sítě dodávat nebo ze sítě odebírat jalový výkon. Zvětšíme-li budící proud generátoru (přebuzení), zvětší se

indukované napětí $E > U$ a v důsledku toho začne vinutím kotvy (statoru) téct proud I , který vytvoří na synchronní reaktanci X_d úbytek napětí $jX_d I$. Proud generátoru I předbíhá napětí sítě U o $\pi/2$, jak lze vidět na Obr. 6.1c, a dodává do sítě jalový výkon, vylepšuje tím její účinník. Synchronní generátor se chová k síti jako kondenzátor.

Při zmenšení budicího proudu (podbuzení) bude $E < U$, proud generátoru se zpožďuje za napětím sítě U o $\pi/2$ (Obr. 6.1d). Generátor odebírá ze sítě jalový výkon induktivního charakteru a tím pádem zhoršuje účinník sítě.

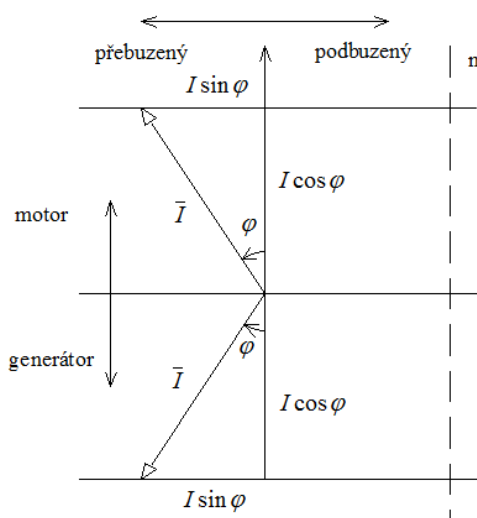
CHOD S NENULOVÝM ČINNÝM VÝKONEM [10]

Pokud hnací stroj vytvoří na hřídeli synchronního stroje (SS) větší moment, než je moment synchronního stroje naprázdno, mění se mechanická energie na elektrickou. Synchronní stroj pracuje jako generátor a dodává do sítě činný výkon. Pokud je ovšem moment hnacího stroje menší než moment synchronního stroje naprázdno, pracuje stroj jako synchronní motor a činný výkon naopak ze sítě odebírá. Synchronní stroj může tedy plynule přecházet ze stavu generátorického do stavu motorického a naopak. Jak v motorickém tak generátorickém stavu může pracovat v podbuzeném i přebuzeném stavu.

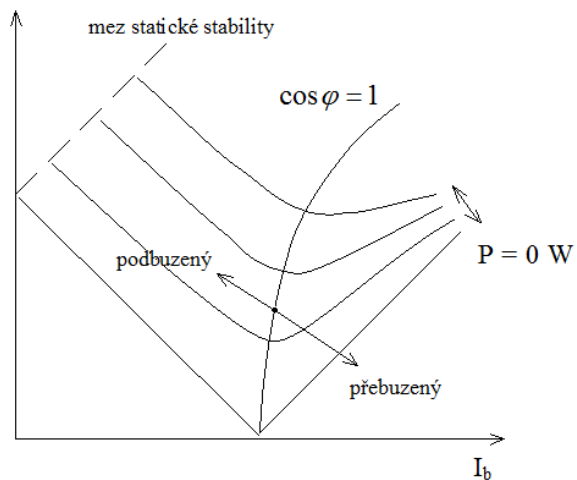
Z rovnice momentu synchronního stroje (6.1) můžeme pozorovat, že při konstantním momentu synchronního stroje zůstává činný výkon synchronního stroje téměř konstantní. Za předpokladu, že výkon sítě je nekonečný (změnou buzení se nebude měnit velikost napětí v síti), bude i velikost činné složky proudu konstantní, neboť je konstantní činný výkon.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{UI \cos \varphi}{\omega} \quad (6.1)$$

Změnou buzení se tedy bude měnit pouze velikost jalové složky proudu, zatímco činná složka zůstává konstantní. Konec fázoru proudu \bar{I} se bude pohybovat po vodorovné přímce a stroj bude podle velikosti budicího proudu I_b buďto v přebuzeném nebo podbuzeném stavu (viz. Obr. 6.2).



Obr. 6.2: K principu SS



Obr. 6.3: V-křivky SS

Pokud vyneseme proud kotvy synchronního stroje jako funkci budicího proudu pro konstantní činné výkony P , dostáváme tzv. V-křivky (Obr. 6.3). Většinou je spodní V-křivka

vynesena pro $P = 0$ W, ostatní křivky jsou pro stoupající hodnoty činného výkonu. Rotační kompenzátory se výhradně používají na hladině VN v rozsáhlejších průmyslových sítích, kde plní většinou funkci centrální kompenzace na hlavní rozvodně, popřípadě na podružné rozvodně napájecí části průmyslových sítí se soustředěnou dominantní spotřebou elektrické energie [3].

V případě hodnocení účinku odběru v každém okamžiku může působit rotační kompenzátor nepříznivě, neboť s ohledem na jeho elektromagnetické časové konstanty případně i na konstanty rotačního budiče (v dnešní době je u moderních synchronních strojů buzení realizováno řízenými usměrňovači) by docházelo k soustavnému krátkodobému nedokompenzování a následnému krátkodobému překompenzování, čímž se může více zvyšovat úroveň kolísání napětí (zhoršuje se kvalita elektrické energie).

6. 2 STATICKÉ KOMPENZÁTORY

Základním prvek sloužícím ke kompenzaci jalového výkonu je buďto kondenzátor nebo výkonový polovodičový prvek. Společným znakem je, že na rozdíl od rotačních kompenzátorů není daný kompenzační prvek v pohybu (pasivní kompenzační prvky).

6. 2. 1 INDIVIDUÁLNĚ PŘIPOJENÉ KONDENZÁTORY

Individuálně připojené kondenzátory se v současné době převážně používají pouze ke kompenzaci jalového výkonu naprázdno silových transformátorů. Jsou připojeny trvale na sekundární stranu transformátoru, obvykle ještě před hlavním jističem a proto s nimi nelze manipulovat při zapnutí ani vypnutí NN jističi. Takovýmto způsobem připojené kondenzátory nelze použít v průmyslových sítích s vyššími úrovněmi energetického rušení, především v oblastech s větším obsahem vyšších harmonických, neboť impedance kondenzátoru se snižuje s frekvencí ($X_C = 1/\omega C$) a může dojít k jeho zničení. Na stabilně připojené kondenzátory ve spojitosti s energetickým rušením se velmi často zapomíná, a proto poté bývají častým zdrojem poruch.

Na hladině VN jsou individuálně připojené kondenzátory spíše výjimkou. Používají se především ke kompenzaci velkých asynchronních motorů, budičů a dalších rotačních strojů. Při návrhu je nutno brát v úvahu jednak charakter práce motoru (např. zatížení, četnost rozběhů), podobně jako na hladině NN úroveň energetického rušení v síti, ale také i kmitočet hromadného dálkového ovládání v dané napájecí oblasti. [3]

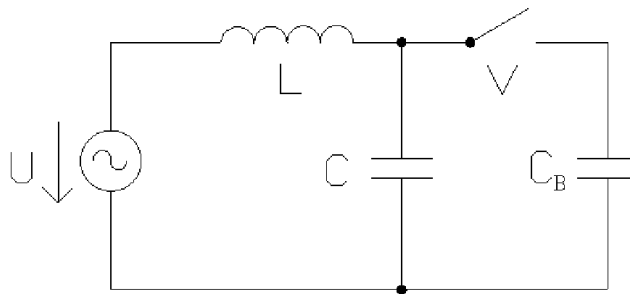
6. 2. 2 STUPŇOVITĚ SPÍNANÉ KOMPENZÁTORY S PROSTÝMI KONDENZÁTORY

V současné době jsou jedním z nejpoužívanějších kompenzačních prostředků v průmyslových sítích NN. Kompenzační výkon je vhodně rozdělen do několika stupňů, jejichž spínání je řízeno regulátorem jalového výkonu.

Spínání jednotlivých stupňů je značně problematické, neboť připnutí kondenzátoru znamená vždy přechodný děj, což má za následek, jak mechanické účinky na spínací zařízení a kondenzátor, tak impulzní rušení v průmyslové síti. Lze rozlišit dva typické případy spínání kondenzátorů:

- připnutí kondenzátoru k síti
- připnutí kondenzátoru paralelně k nabitě kondenzátorové baterii,

kde pod prvním případem, který se vyskytuje málokdy, je myšleno připnutí prvního kompenzačního stupně a přechodný proud je omezován poměrně velkou impedancí sítě. V druhém případě je impedance omezující amplitudu přechodného proudu poměrně nízká. Amplituda proudu při přechodném ději dosahuje více než 100 násobku jmenovitého proudu kondenzátoru při frekvenci řádově desítek kilohertzů. [3]



Obr. 6.4: Připnutí kondenzátoru k síti [25]

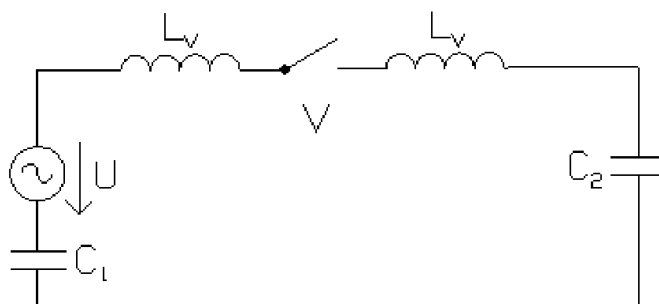
Sepnutím vypínače V (Obr. 6.4) dojde k připojení kondenzátorové baterie C_B , vzniká kmitavý proud a napětí o úhlové frekvenci ω_0

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_B}}. \quad (6.2)$$

Nárazový proud je omezen pouze indukčností sítě L . Je-li I_C jmenovitý proud baterie, pak pro velikost první amplitudy nárazového proudu I_p bude platit

$$I_p = \frac{\omega_0}{\omega} I_C, \quad (6.3)$$

kde ω je úhlová frekvence sítě.



Obr. 6.5: Připnutí kondenzátoru paralelně k nabitě kondenzátorové baterii [25]

Na Obr. 6.5 je zobrazeno připínání kondenzátorové baterie C_1 vypínačem V k již nabitě baterii C_2 . Protože je velikost indukčnosti L ($L=2L_v$) spojovacích přípojníc (kabelů) malá, je vzniklý nárazový proud mnohem větší než při připínání baterie k síti, jak bylo naznačeno výše (I_p dosahuje až $100I_n$). Přechodný proud má vlastní úhlovou frekvenci

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (6.4)$$

a velikost první amplitudy proudu se vypočte ze vztahu (6.3). Přepětí při připínání kondenzátorových baterií nepřevyšují dvojnásobek napájecího napětí, a proto nejsou příliš nebezpečná. Při vypínání kondenzátorových baterií může za určitých podmínek docházet k velkým přepětím, která mohou poškodit zařízení rozvodu a být tak příčinou poruch. [31]

K omezení přechodného děje se vřazuje do série se spínanými kondenzátory impedance a to:

- trvalým připojením indukčnosti
- přechodným vřazením odporu

Jelikož je trvalé připojení tlumivky (indukčnosti) opatřením relativně drahým, využívá se pouze v případech, kdy je potřeba eliminovat rezonanční jevy a k omezení přechodného jevu se použije druhého způsobu, který spočívá v krátkodobém vřazení odporu do série s kondenzátorem na dobu první fáze sepnutí. Speciálně k tomuto účelu jsou konstruované stykače např. od firmy Benedikt, tzv. stykače s odporovým spínáním, které mají dvě sady kontaktů. Pomocnými kontakty, které spínají v předstihu, se zařadí do série s kondenzátorem tlumicí odpory, které jsou obvykle součástí stykače. Po několika milisekundách spínají kontakty hlavní, které překlenou vřazené odpory. Díky pomocným kontaktům, které spínají tlumicí odpory, nedochází k napalování kontaktů hlavních a dochází k potlačení proudových špiček při sepnutí zátěže na hodnotu menší 70 násobku jmenovitého provozního proudu. Zmenšení proudového nárazu zvyšuje životnost stykače i kondenzátoru. Stykačů s odporovým spínáním se používá výhradně na hladině NN. K omezení přechodného děje při sepnutí kondenzátorové baterie na hladině VN se připojuje indukčnost (*Obr. 6.6*).



Obr. 6.6: Klasická kompenzace na hladině VN [20]

Na hladině VN je tento typ kompenzačního zařízení používán ojediněle. Při návrhu kompenzace je nutno brát v úvahu jako v předchozím případě (při individuálně připojených kondenzátorech na hladině VN) úroveň energetického rušení a přítomnost signálu HDO.

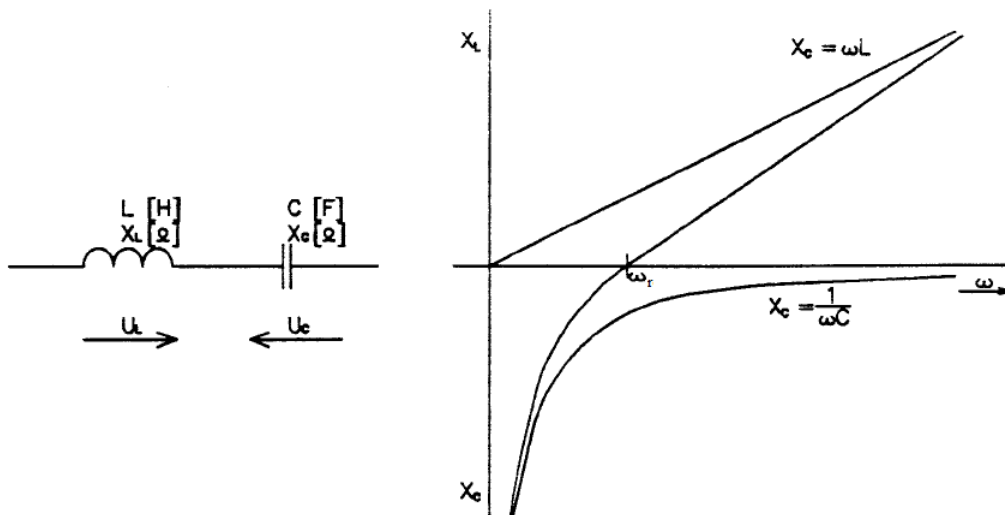
6. 2. 3 STUPŇOVITĚ SPÍNANÉ KOMPENZÁTORY S CHRÁNĚNÝMI (HRAZENÝMI) KOMPENZAČNÍMI SEKCEMI

Hrazené kompenzační rozváděče jsou vhodné tam, kde je míra ovlivnění sítě nelineárními spotřebiči velká. Kondenzátorům jednotlivých stupňů jsou předřazeny ochranné tlumivky, které tvoří s kondenzátory rezonanční LC obvod naladěný pod frekvenci nejnižší v síti se vyskytující harmonické. Tímto je zabráněno přetěžování kondenzátoru vyššími harmonickými proudy. Také lze volit frekvenci sériového rezonančního obvodu tak, aby byla alespoň částečně filtrována nejnižší v síti se vyskytující harmonická. [22]

Pro rezonanční frekvenci případně rezonanční úhlovou frekvenci platí známý vztah

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (6.5)$$

Na Obr. 6.7 lze vidět, jak se mění charakter impedance rezonančního obvodu se změnou úhlové frekvence popřípadě frekvence. Pro frekvence nižší než rezonanční frekvence převládá kapacitní reaktance, hluboko pod rezonanční frekvenci se obvod bude chovat jako



Obr. 6.7: K sériové rezonanci [3]

kondenzátor. Nad rezonanční frekvencí má obvod charakter induktivní reaktance a při vyšších frekvencích se bude chovat jako indukčnost. V souvislosti s hrazenou kompenzací se používá pojmu činitel zatlumení nebo též zacívkování p pro nějž platí

$$p = \frac{\omega L}{1/\omega C} \cdot 100\% = \left(\frac{1}{\frac{f_r}{f_n}} \right)^2 \cdot 100\% = \left(\frac{50}{f_r} \right)^2 \cdot 100\%. \quad (6.6)$$

Na základě dosavadních zkušeností s výrobou, montáží a provozem stupňovitě spínaných kompenzačních zařízení nízkého napětí sestavených z chráněných kompenzačních sekcí lze konstatovat, že se osvědčilo v jednom kompenzačním zařízení používat minimální množství různých výkonových stupňů (optimálně 2 až 3). [3]

Při volbě kondenzátorů je nutno brát v úvahu, že připojením tlumivky se na kondenzátoru zvýší provozní napětí oproti síťovému, a proto se instalují kondenzátorové baterie se jmenovitým napětím vyšším.

Tyto obecné zásady platí jak pro kompenzaci na hladině NN tak VN. Na hladině VN je tohoto typu kompenzačního zařízení používáno častěji, než předešlého typu. Jednak z důvodu omezení amplitudy proudu při spínání kondenzátorů a jednak jako ochrany kondenzátorů před harmonickými.

Nutno zmínit, že tam, kde je potřeba na hladině NN rychlá změna kompenzačního výkonu (např. svářečky, speciální pohony) je možné využít pro spínání jednotlivých kompenzačních stupňů tzv. bezkontaktních spínačů (pokud nechceme využít dražšího kompenzačního zařízení s plynulou regulací jalového výkonu). K sepnutí kompenzačního stupně je místo stykače použit bezkontaktní polovodičový prvek tvořený většinou dvěma antiparalelně zapojenými tyristory, případně tranzistory. Většinou se bezkontaktního spínání využívá u hrazených kompenzačních sekcí, ale je možno ho použít také pro spínání sekcí tvořených prostými kondenzátory. Bezkontaktní spínače zajišťují pokud možno spínání bez přechodných jevů, a proto jsou také vhodné do prostředí citlivých na energetické rušení. Většímu nasazení v průmyslových sítích zabraňuje jejich vyšší cena, než kompenzačních zařízení využívajících ke spínání jednotlivých stupňů stykačů.

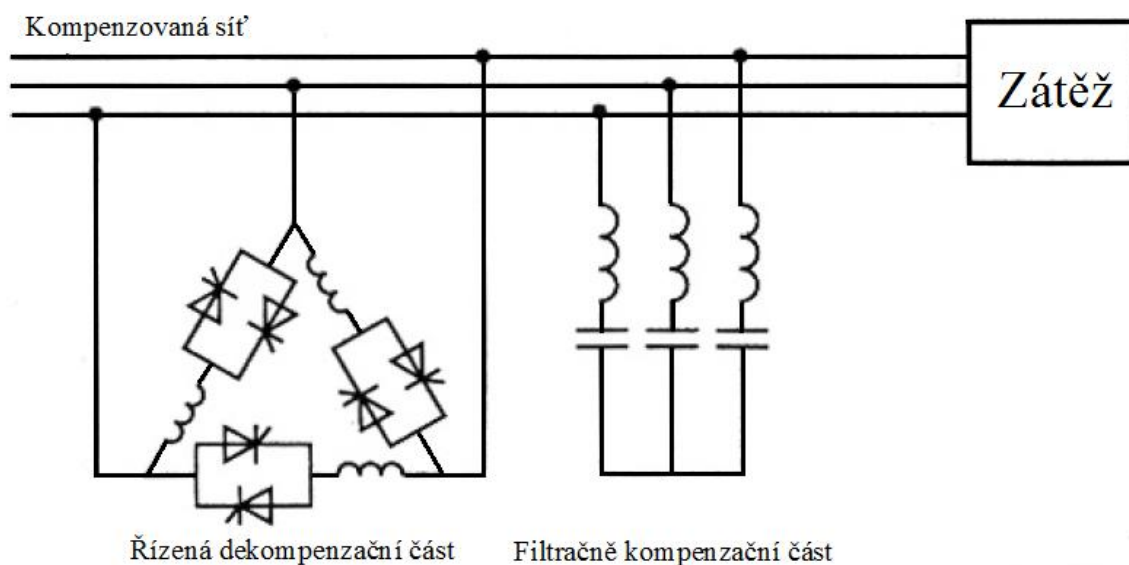


Obr. 6.8: Bezkontaktní (vlevo) a stykačově spínaná (vpravo) hrazená kompenzace na NN [22]

6. 2. 4 PLYNULE ŘÍZENÉ KOMPENZAČNÍ FILTRY

Stejně jako v předcházejícím případě je ke skupině kondenzátorů předřazena tlumivka, která tvoří spolu s kondenzátorem (kondenzátorovou baterií nebo skupinou baterií) sériový rezonanční LC obvod, který je naladěn na frekvenci charakteristické harmonické (pro danou harmonickou má tedy nejmenší impedanci, působí jako filtr, odsává ji) a současně dodává spotřebiči jalový výkon. Jelikož změnou velikosti kapacity kondenzátorů bychom rozladili LC obvod naladěný na danou harmonickou, je kompenzační filtr trvale připojen k síti a řízení

jalového výkonu se děje pomocí tzv. dekompenzačního členu, tvořeného střídavým měničem napětí (většinou dva antiparalelně řazené tyristory) a na něj připojenou dekompenzační tlumivkou. Přebytný jalový výkon odebírá tedy tlumivka řízená střídavým měničem napětí.



Obr. 6.9: Plynule řízené kompenzační filtry [13]

V praxi bývá k síti připojeno několik filtrů naladěných na frekvence charakteristických harmonických (záleží na spotřebiči např. na 5. 7. 11. harmonickou) a k nim je paralelně připojen dekompenzační člen viz Obr. 6.9.

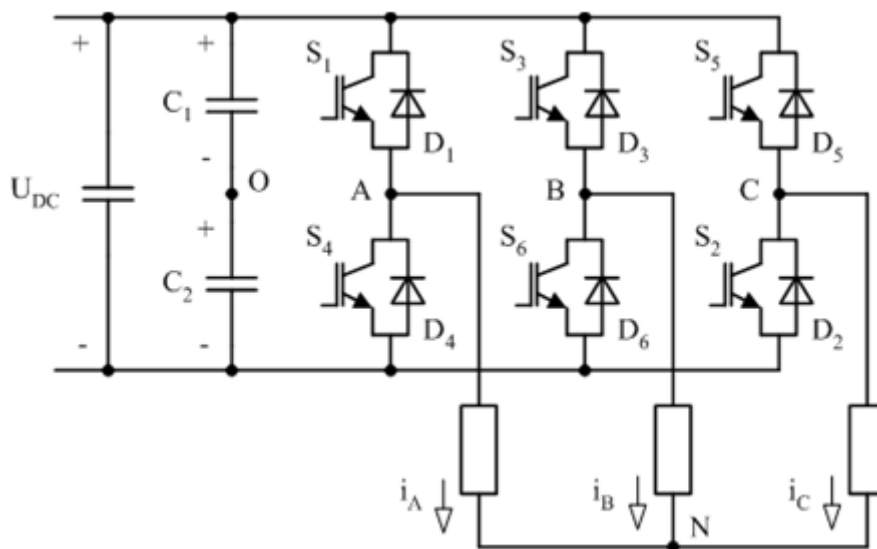
Plynule řízené kompenzační filtry lze využít, jak na hladině NN tak VN. V průmyslových sítích VN, kde je odebíraný jalový výkon málo proměnný nebo se změny odebíraného jalového výkonu dějí pomalu, jsou instalovány stupňovitě spínané kompenzační filtry, které bývají často nutným technickým a ekonomickým kompromisem mezi požadavky dodavatele elektrické energie a finančními možnostmi odběratele. [3]

6. 2. 5 AKTIVNÍ FILTRY

Výše uvedená kompenzační zařízení kromě dodávky jalového výkonu spotřebiči, ať už ve větší či menší míře, vylepšovala kvalitu elektrické energie, tedy eliminovala energetická rušení. Z principu jejich funkce nelze ovšem řešit všechny problémy eliminace energetického rušení, i když použijeme principy bezkontaktních, rychlých stupňových kompenzátorů nebo plynule řízených dekompenzačních reaktorů. Eliminaci energetických rušení spotřebičů, např. regulovaných pohonů, frekvenčních měničů atd., je možné provádět pouze opět zařízeními pracujícími na stejném principu. Tato moderní zařízení se obecně nazývají aktivní filtry.[12]

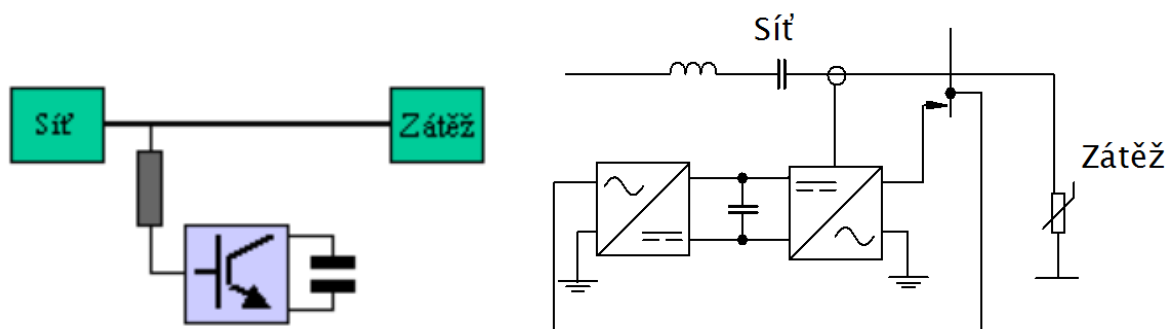
Hlavními prvky tvořící tyto kompenzační prostředky jsou trojfázové napěťové střídače z IGBT tranzistorů (Obr. 6.10). Aktivní filtry lze považovat za paralelně nebo sériově zapojené generátory, řízené vhodným regulačním systémem tak, aby i v dynamických stavech byla zajištěna požadovaná kompenzace nevhodných harmonických složek. Způsobem zapojení aktivního filtru do sítě lze vylepšit proud, napětí nebo obojí. Aktivní filtr je schopen odstranit harmonické proudy, tak, že generuje shodné složky proudu, ale opačného směru a zavádí je do sítě. Pro pochopení kompenzace jalového výkonu aktivním filtrem, je vhodné

přirovnat ho k synchronnímu generátoru, který změnou buzení, tedy změnou velikosti indukovaného napětí, buď do sítě dodává, nebo ze sítě odebírá jalový výkon. Jalový výkon aktivního filtru je tedy řízen změnou velikosti napětí kompenzátoru. Pokud je toto napětí vyšší než napětí sítě, je do sítě jalový výkon dodáván. Pokud je napětí kompenzátoru menší, je ze sítě jalový výkon odebírán (Viz kapitola 6.1, Obr. 6.1).



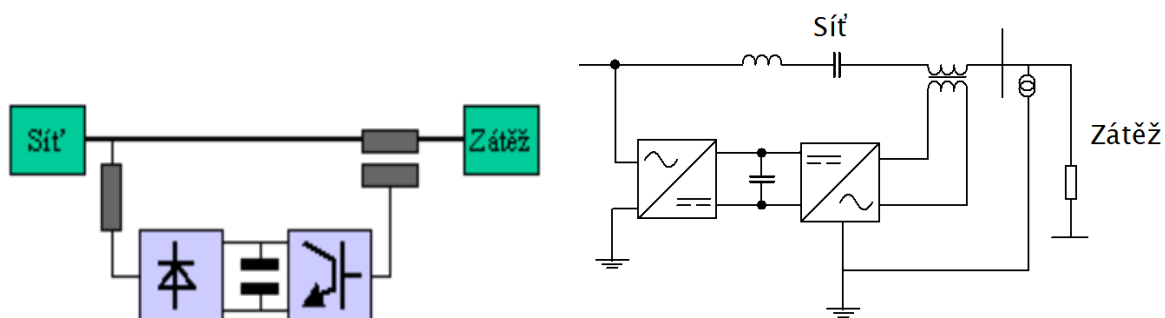
Obr. 6.10: Základní stavební prvek aktivních filtrů (napěťový střídač) [28]

Při zapojení aktivního filtru dle Obr. 6.11 je možno upravit výstupní proud na požadovaný tvar. Při tomto zapojení je aktivní filtr tvořen generátorem proudu, který injektuje zbytkovou křivku proudu, tedy rozdíl mezi harmonickou křivkou proudu, která je ve fázi s napětím, a křivkou proudu odebíraného spotřebičem. Dále filtr kompenzuje jalový výkon (způsobem popsaným výše) a je schopen upravit nesymetrickou zátěž na symetrickou.[13]



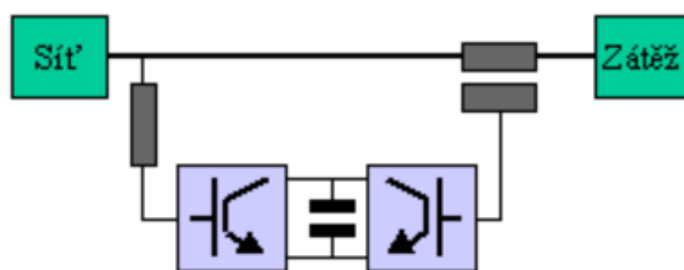
Obr. 6.11: Derivační (paralelní) aktivní filtr [12]

Je-li zapojen aktivní filtr podle Obr. 6.12, je naopak možné upravovat napětí. Tedy aktivní filtr udržuje amplitudu napětí, kompenzuje poklesy i špičky, odstraňuje harmonické, zajišťuje symetrické rozložení napětí, a pokud je napájený nezávislým zdrojem, může v případě výpadku napětí dodávat také elektrickou energii. Paralelní filtry tedy kompenzují rušivé vlivy zátěže na síť, kdežto sériové filtry naopak vylepšují kvalitu elektrické energie dodávané zátěži.



Obr. 6.12: Sériový aktivní filtr [12]

Oba způsoby připojení aktivního filtru je možno zkombinovat v jeden celek (Obr. 6.13), čímž vznikne systém, který zajišťuje jak kvalitní napětí pro napájení spotřebičů (kvalitní napětí v místě připojení filtru), tak i eliminaci rušivých vlivů způsobených těmito spotřebiči (definovaný průběh proudu).



Obr. 6.13: Kombinovaný aktivní filtr [12]

Česká firma ELCOM se zabývá vývojem a výrobou těchto zařízení do výkonu řádově stovek kVA. Prozatím se tyto nové produkty uplatní v sítích NN s relativně malými nelineárními spotřebiči. Na hladině VN vyrábí podobné produkty firma ABB např. zařízení STATCOM. [29]

6.3 POROVNÁNÍ KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ Z POHLEDU CPC

V této kapitole je provedeno názorné porovnání jednotlivých kompenzačních zařízení z hlediska maximálního možného dosaženého účinníku (λ_{max}), určeného velikostí jednotlivých proudových fyzikálních složek.

Jak pro rotační tak i pro statické kompenzátory, jako jsou individuálně připojené kondenzátory, stupňovitě (bezkontaktně, kontaktně) spínané zařízení s prostými nebo hrazenými kondenzátory, může být dosaženo maximálního účinníku

$$\lambda_{max} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D_s^2 + D^2}} = \frac{\|i_a\|}{\sqrt{\|i_a\|^2 + \|i_s\|^2 + \|i_u\|^2}}$$

Hrazené kompenzační sekce mohou být naladěny na frekvenci nejnižší v síti se vyskytující harmonické proudu a proudová složka i_s nebo výkonová složka D_s bude menší oproti výše vypsáním zařízením, čímž bude menší i účinník.

Pro plynule řízené nebo spínané pasivní filtry může teoreticky účinník nabývat hodnoty

$$\lambda_{\max} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2}} = \frac{\|\mathbf{i}_a\|}{\sqrt{\|\mathbf{i}_a\|^2 + \|\mathbf{i}_u\|^2}}.$$

V současnosti nejdokonalejším zařízením umožňujícím teoreticky dosáhnout účinníku $\lambda_{\max} = 1$ je aktivní filtr (paralelní, kombinovaný)

$$\lambda_{\max} = \frac{P}{S} = \frac{P}{P} = \frac{\|\mathbf{i}_a\|}{\|\mathbf{i}_a\|} = 1$$

- 48 -

Účelem měření bylo měřit úroveň vyšších harmonických a velikosti výkonů vývodů R201 R202 pro náhradu generátorů statickou kompenzací 6 kV. Měření bylo prováděno při běžném zatížení.

Na R201 byly měřeny vývody T103, 110 kV/6,3 kV, 25 MVA, 3000/1 A a TG9, 2500/1 A
Na R202 byly měřeny vývody T104, 110 kV/6,3 kV, 25 MVA, 2500/1 A a TG1, 2500/5 A

V uvedených vývodech byly měřeny:

- a) proudy a napětí
- b) činný a jalový výkon
- c) účinník a zkreslení napětí
- d) vyšší harmonické napětí a proudu, liché do řádu 50.

Měření napětí bylo provedeno z napěťových měničů 6/0,1 kV a proudů z měřicích transformátorů 2500/5 A, 2500/1 A a 3000/1 A kleštěmi MN71 s rozsahy 2 A/1 V a 10 A/1 V.

Vzorkovací interval pro měření byl volen 3 sekundy.

Přístroje použité při měření:

- Klešťový ampérmetr KEWTECH KT203, v. č. 0286418, 0 – 400 A
- RLC METER MIC-407D, v. č. 3H D00109-N/C
- Zkoušečka Voltcraft VC86, v. č. 07125985
- Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA 330

V přílohách 1-12 jsou vybrané průběhy těchto měřených veličin:

- a) napětí
- b) činný a jalový výkon
- c) celkové harmonické zkreslení napětí
- d) 4. harmonická napětí a proudu pocházející ze signálu HDO

Jelikož provedená 15 min měření neposkytují dostatečné informace ohledně proměnlivosti a velikosti odběru jalového výkonu, byla od zadavatele zakázky poskytnuta data naměřených hodnot výkonů na jednotlivých vývodech transformátorů 110/6,3 kV, z kterých byly vyneseny průběhy činných a jalových výkonů na rozvodnách 6 kV (R201 a R202). V Příloze 13 a 14 jsou odběry činných a jalových výkonů na rozvodnách za období jednoho měsíce. V Příloze 15 jsou průběhy jalových výkonů během jednoho dne. Vynesené průběhy výkonů jsou pro stav, kdy všechny generátory, které dodávaly dříve do rozvodu 6 kV energii (činnou i jalovou), jsou již kompletně odstaveny. Při měření provedeném firmou Kompel, pracovaly ještě do rozvodu 6 kV generátory TG1 a TG9.

7. 2. 1 VÝSELDKY MĚŘENÍ

Výsledky měření na TG1/R202 čase od 11:48 h do 12:24 h

Příloha 1 (Obr. 1) – zobrazuje časový průběh sdruženého napětí L1, L2, L3 v rozsahu 6,38 kV až 6,398 kV tj. 106,33% až 106,6% jmenovitého.

Příloha 1 (Obr. 2) – zobrazuje dodávaný činný výkon v rozsahu od 8800 kW do 10000 kW.

Příloha 2 (Obr. 1) – zobrazuje odebíraný jalový výkon (induktivní) v rozsahu 7300 kVAr až 7850 kVAr.

Příloha 2 (Obr. 2) – celkové harmonické zkreslení napětí kolísá od 0,38% do 0,44% (0,41%).

Příloha 3 (Obr. 1, Obr. 2) – harmonické spektrum napětí je s výraznou složkou 4. harmonické pocházející ze signálu HDO (183,3 Hz) ve výši 0,2%.

Výsledky měření na T104/R202 čase od 12:44 h do 13:08 h

Příloha 4 (Obr. 1) – zobrazuje časový průběh sdruženého napětí L1, L2, L3 v rozsahu 6,25 kV až 6,275 kV tj. 104,16% až 104,58% jmenovitého.

Příloha 4 (Obr. 2) – zobrazuje odebíraný činný výkon v rozsahu od 1400 kW do 4600 kW.

Příloha 5 (Obr. 1) – zobrazuje dodávaný jalový výkon (kapacitní) v rozsahu 3400 kVAr až 4000 kVAr.

Příloha 5 (Obr. 2) – celkové harmonické zkreslení napětí kolísá od 0,15% do 0,46% (0,31%).

Příloha 6 (Obr. 1, Obr. 2) – harmonické spektrum napětí je s výraznou složkou 4. harmonické pocházející ze signálu HDO (183,3 Hz) ve výši 0,47%.

Výsledky měření na T103/R201 čase od 13:21 h do 13:40 h

Příloha 7 (Obr. 1) – zobrazuje časový průběh sdruženého napětí L1, L2, L3 v rozsahu 6,345 kV až 6,36 kV tj. 105,75% až 106% jmenovitého.

Příloha 7 (Obr. 2) – zobrazuje odebíraný činný výkon v rozsahu 14250 kW až 16300 kW.

Příloha 8 (Obr. 1) – zobrazuje odebíraný jalový výkon (induktivní) v rozsahu 4700 kVAr až 4900 kVAr.

Příloha 8 (Obr. 2) – celkové harmonické zkreslení napětí kolísá od 0,14% do 0,22% (0,18%).

Příloha 9 (Obr. 1, Obr. 2) – harmonické spektrum napětí je s výraznou složkou 4. harmonické pocházející ze signálu HDO (183,3 Hz) ve výši 0,45%.

Výsledky měření na TG9/R201 čase od 13:53 h do 14:15 h

Příloha 10 (Obr. 1) – zobrazuje časový průběh sdruženého napětí L1, L2, L3 v rozsahu 6,32 kV až 6,33 kV tj. 105,3% až 105,5% jmenovitého.

Příloha 10 (Obr. 2) – zobrazuje dodávaný činný výkon v rozsahu od 8600 kW do 10500 kW.

Příloha 11 (Obr. 1) – zobrazuje dodávaný jalový výkon (kapacitní) v rozsahu 3900 kVAr až 4300 kVAr.

Příloha 11 (Obr. 2) – celkové harmonické zkreslení napětí kolísá od 0,175% do 0,2% (0,19%).

Příloha 12 (Obr. 1, Obr. 2) – harmonické spektrum napětí je s výraznou složkou 4. harmonické pocházející ze signálu HDO (183,3 Hz) ve výši 0,12%.

Výsledky měření na vývodech T101 (T102) a T103 (T104) - od provozovatele podniku

Příloha 13 – zobrazuje měsíční průběhy činných výkonů v rozsahu cca 15000 - 34000 kW na R201 a v rozsahu cca 14000- 38000 kW na R202. Jak na R201 tak i na R202 po většinu času odebírán činný výkon cca 30000 kW.

Příloha 14 – zobrazuje měsíční průběhy činných výkonů v rozsahu cca 6000 - 12000 kVAr na R201 a v rozsahu cca 6000 - 13000 kVAr na R202. Na R201 je po většinu času odebírán výkon cca 11000 kVAr. Na R202 po většinu času odebírán činný výkon cca 7000 kVAr.

Příloha 15 – zobrazuje denní průběhy činných výkonů v rozsahu 27100 - 27900 kW na R201 a v rozsahu 28800 - 29800 kW na R202.

Příloha 16 – zobrazuje denní průběhy jalových výkonů v rozsahu 11025 - 11350 kVAr na R201 a v rozsahu 6250 - 6610 kVAr na R202.

7. 2. 2 SHRUTÍ MĚŘENÍ

Rozvodna R201

V době měření zde napětí kolísalo v rozsahu 105,3% až 106,0% (**105,7%**) jmenovitého napětí 6 kV.

Po odstavení generátoru TG9 je přes transformátory T101 a T103 odebírán maximální činný výkon **34000 kW** a minimální činný výkon **15000 kW**. Po většinu období je odebírán činný výkon **30000 kW**. Denní odběr jalového výkonu je téměř konstantní, tudíž nebude potřeba častého spínání stupňů během dne.

Jak celkové *THDu* (0,19%), tak úroveň signálu HDO (0,3%) jsou na R201 velice nízké a nijak podstatně neovlivní statickou kompenzaci.

Rozvodna R202

V době měření zde napětí kolísalo v rozsahu 104,1% až 106,6% (**105,4%**) jmenovitého napětí 6 kV.

Po odstavení generátoru TG91 je přes transformátory T102 a T104 odebírán maximální činný výkon **38000 kW** a minimální činný výkon **14000 kW**. Po většinu období je odebírán činný výkon **30000 kW**. Denní odběr jalového výkonu je téměř konstantní, tudíž nebude potřeba častého spínání stupňů během dne.

Jak celkové *THDu* (0,4%), tak úroveň signálu HDO (0,4%) jsou na R202 velice nízké a nijak podstatně neovlivní statickou kompenzaci.

8. POSOUZENÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ

Jelikož má podnik nevyužitá kompenzační zařízení, byl vznesen požadavek na posouzení možnosti využití stávajících kompenzací.

POPIS STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ RCPA 1,2 A RCPB 1,2

Všechna 4 stávající kompenzační zařízení vyrobená v roce 2002 a používaná přibližně 5 let jsou identická a jsou sestavena takto:

- Vývodové pole rozvodny 6 kV s vypínačem a vybavenými ochranami bez předřadné reaktance s kabelovými přívody na pojistkový odpínač NALF 12 kV (vypínací kapacitní proud je 150 A)[16], s pojistkami CMF 7,2 kV, 250 A [17] s motorovým pohonem a zkratovou odolností 30 kA (1s)
- Za pojistkami, které omezují dynamický zkratový proud, jsou instalovány jednofázové kondenzátory ABB 3,465 kV (6 kV), 416,7 kVAr, 50 Hz v zapojení do dvojité hvězdy s uzly propojenými přes přístrojový transformátor proudu 10/20/5A (pro registraci nesymetrie-balanční ochranou)
- Pro rychlovybíjení jsou na vstupu baterie zapojeny mezifázově dva přístrojové transformátory napětí

Celkový kompenzační výkon v RCPA1 (A2,B1,B2) je 20000 kVAr – 4 kompenzace 5000 kVAr, každá se dvěma sekcemi 2500 kVAr. Možnost regulace je tedy ve stupních 8x12,5% celkového výkonu.

Tab. 8-1: Kapacita kondenzátorových baterií ($C_n = 110 \mu F$)

Baterie	C1-C2	C1-C3	C2-C3	Odchylky C od C_n
[-]	[μF]	[μF]	[μF]	[% C_n]
CA1.1	110,0	109,7	110,1	0; -0,3; +0,1
CA1.2	108,9	108,4	108,5	-1; -1,5; -1,4
CA2.1	109,2	109,8	109,5	-0,7; -0,2; -0,5
CA2.2	109,5	109,7	109,4	-0,5; -0,3; -0,5
CB1.1	109,8	110,2	109,4	-0,2; +0,2; -0,5
CB1.2	107,7	108,0	107,1	-2,1; -1,8; -2,6
CB2.1	107,2	106,8	108,3	-2,5; -2,9; -1,5
CB2.2	109,1	108,0	107,9	-0,8; -1,8; -1,9

8.1 URČENÍ VELIKOSTI KOMPENZAČNÍHO VÝKONU

Dle charakteristiky podniku jako petrochemický závod, volíme podle praktických zkušeností a konzultace u firmy Kompel účinník odběru $\cos\varphi = 0,88$ (plyne z použité technologie podniku, naměřených činných a jalových výkonů za cca 3 měsíce).

Na R201 je přes transformátory T101 a T103 odebírán maximální činný výkon **34000 kW** a minimální činný výkon **15000 kW**.

Velikost kompenzačního jalového výkonu určíme ze vztahu

$$Q_k = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) = P(\operatorname{tg}(\arccos(\cos \varphi)) - \operatorname{tg}(\arccos(\cos \varphi_k))) \quad (8.1)$$

Maximální velikost kompenzačního výkonu na R201

$$Q_{k,\max} = 34000 \cdot (\operatorname{tg}(\arccos(0,88)) - \operatorname{tg}(\arccos(0,95))) = 7176 \text{ kVAr}$$

Minimální velikost kompenzačního výkonu na R201

$$Q_{k,\min} = 15000 \cdot (\operatorname{tg}(\arccos(0,88)) - \operatorname{tg}(\arccos(0,95))) = 3166 \text{ kVAr}$$

Na R202 je přes transformátory T102 a T104 odebírán maximální činný výkon **38000 kW** a minimální činný výkon **14000 kW**

Maximální velikost kompenzačního výkonu na R202

$$Q_{k,\max} = 38000 \cdot (\operatorname{tg}(\arccos(0,88)) - \operatorname{tg}(\arccos(0,95))) = 8020 \text{ kVAr}$$

Minimální velikost kompenzačního výkonu na R202

$$Q_{k,\min} = 14000 \cdot (\operatorname{tg}(\arccos(0,88)) - \operatorname{tg}(\arccos(0,95))) = 2955 \text{ kVAr}$$

Nejčastější potřebný kompenzační výkon na rozvodnách 6 kV (při účinníku 0,88 většinu času bude větší)

$$Q_{k,\max} = 30000 \cdot (\operatorname{tg}(\arccos(0,88)) - \operatorname{tg}(\arccos(0,95))) = 6332 \text{ kVAr}$$

Vypočtené hodnoty ukazují, jaká potřeba kompenzačního výkonu bude při současném provozu podniku. Maximální možný potřebný kompenzační výkon na každou rozvodnu je cca 10 MVar a minimální potřebný kompenzační výkon je cca 1,7 MVar (výpočet je proveden v 9. kapitole a je odvozen z maximálního možného přenášeného výkonu přes transformátory T101 (T102) T103 (T104) a minimálního možného odebíraného výkonu, plynoucího z použité technologie podniku).

Z výše provedených výpočtů kompenzačních jalových výkonů, je možnost umístit kompenzační zařízení RCPA1 a RCPA2 (10000 kVAr) na R201 a kompenzační zařízení RCPB1 a RCPB2 na R202 (10000 kVAr).

8.2 Vliv naměřených parametrů kvality elektřiny

Krátkodobé měření velikosti sdruženého napětí na R201 vykazuje hodnoty v rozmezí 105,3% až 106% (105,7%) jmenovitého napětí 6 kV. Pro kondenzátory s přímým připojením na hladinu 6 kV, které mají jmenovité fázové napětí 3,465 kV, to znamená trvalé přetížení o 5,3% až 6% (5,7%).

Krátkodobé měření velikosti sdruženého napětí na R202 vykazuje hodnoty v rozmezí 104,13% až 106,6% (105,4%) jmenovitého napětí 6 kV a tedy trvalé přetížení o 4,1% až 6,6% (5,4%).

Velikost celkového harmonického zkreslení napětí THD_U na rozvodnách R201 a R202 je velmi malá (díky malému množství nelineárních spotřebičů a velkému zkratovému výkonu). Stejně tak i velikost harmonických napětí a proudů je minimální s nejvyšší 4. harmonickou

pocházející ze signálu HDO. Jak celkové THD_U , tak i signál HDO nebude mít vliv na statickou kompenzaci.

8.3 KONTROLA ZKRATOVÉ ODOLNOSTI A ODSÁVÁNÍ SIGNÁLU HDO

8.3.1 KONTROLA NA ODOLNOST PROTI ZKRATU

Transformátory 110/6,3 kV budou do každé rozvodny pracovat paralelně. Rozvodny R201 a R202 budou pracovat odděleně, tudíž nebudou propojené. Uvažujeme, že v místě zkratu bude napětí cca $U_v = 6,3$ kV a budeme uvažovat pouze příčné reaktance (méně příznivý výsledek)

Transformátor T101 (102), $S_n = 35$ MVA, $u_k = 14\%$

$$X_{t101} = u_k \frac{U_v^2}{S_n} = 0,14 \cdot \frac{6300^2}{35 \cdot 10^6} = 0,158 \Omega \quad L_{t101} = 0,503 \text{ mH}$$

Transformátor T103 (104), $S_n = 25$ MVA, $u_k = 10,3\%$

$$X_{t103} = u_k \frac{U_v^2}{S_n} = 0,103 \cdot \frac{6300^2}{25 \cdot 10^6} = 0,163 \Omega \quad L_{t103} = 0,519 \text{ mH}$$

Reaktor $U_n = 6$ kV, $I_n = 2000$ A, $u_k = 11\%$

$$X_{r(11\%)} = u_k \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = 0,11 \cdot \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 2000} = 0,190 \Omega \quad L_{r(11\%)} = 0,605 \text{ mH}$$

Reaktor $U_n = 6$ kV, $I_n = 600$ A, $u_k = 8\%$ (stávají reaktory podniku, možnost využití)

$$X_{r(8\%)} = u_k \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = 0,08 \cdot \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 600} = 0,461 \Omega \quad L_{r(8\%)} = 1,47 \text{ mH}$$

Sít' 110 kV (R101, R102), $S_k = 3340$ MVA, $U_n = 110$ kV, $c = 1,1$

$$X_s = c \frac{U_v^2}{S_k} = 1,1 \cdot \frac{6300^2}{3340 \cdot 10^6} = 0,013 \Omega \quad L_s = 0,0414 \text{ mH}$$

Celková reaktance po R201 (R202)

$$X_{cel} = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{t101}} + \frac{1}{X_{t103} + X_{r(11\%)}}} = 0,013 + \frac{1}{\frac{1}{0,158} + \frac{1}{0,163 + 0,190}}$$

$$X_{cel} = 0,122 \Omega$$

Velikost počátečního rázového zkratového proudu na R201 (R202)

$$I_k^{(3)} = c \frac{U_v}{\sqrt{3} X_{cel}} = 1,1 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 0,122} = 32,8 \text{ kA}$$

Od provozovatele podniku bylo zadáno zvýšení zkratového proudu na 50 kA na R201 (R202). Námi vypočtený zkratový proud byl určen při plném odstavení generátorů pracujících do R201 (R202).

Při navýšeném zkratovém proudu na $I_k'' = 50$ kA bude velikost nárazového zkratového proudu dána vztahem

$$I_{km} = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 50 = 125 \text{ kA}$$

a reaktance zkratového obvodu při 50 kA

$$X_{cel(50kA)} = c \frac{U_v}{\sqrt{3} I_k''} = 1,1 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 50 \cdot 10^3} = 0,080 \Omega$$

Kvůli zkratové odolnosti odpínače je potřeba omezit počáteční rázový zkratový proud na 30 kA.

Výsledná reaktance zkratového obvodu pro 30 kA bude tedy mít velikost

$$X_{poř.} = c \frac{U_v}{\sqrt{3} I_k} = 1,1 \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 30 \cdot 10^3} = 0,1334 \Omega$$

Pro omezení zkratového proudu na 30 kA je potřeba mezi rozvodnu R201 (R202) a kompenzační zařízení vřadit reaktor o velikosti reaktance

$$X_r = X_{poř.} - X_{cel(50kA)} = 0,1334 - 0,08 = 0,0534 \Omega$$

$$U_r = X_r I_n = 0,0534 \cdot 1000 = 53,4 \text{ V}$$

$$u_r = \frac{U_r \sqrt{3}}{U_n} \cdot 100 = \frac{53,4 \cdot \sqrt{3}}{6000} \cdot 100 = 1,54\%$$

K omezení zkratového proudu tedy volíme reaktor 6 kV; 1,6%; 1000 A

Skutečná reaktance reaktoru

$$X_{r(1,6\%)} = u_r \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = 0,016 \cdot \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 1000} = 0,0554 \Omega \quad L_{r(1,6\%)} = 0,176 \text{ mH}$$

8. 3. 2 KONTROLA ODSÁVÁNÍ SIGNÁLU HDO A SPÍNACÍCH PROUDŮ

Jak bylo uvedeno výše, na každou rozvodnu budou dvě kompenzační zařízení, každá se dvěma sekcemi o výkonu 2500 kVAr. Tedy celkově na každé rozvodně budou 4 stupně po 2500 kVAr.

V dané oblasti je signál HDO vysílán na frekvenci 183,3 Hz

Velikost indukčnosti mezi sítí 110 kV a kompenzací

$$L = L_{r(1,6\%)} + \frac{1}{\frac{1}{L_{t101}} + \frac{1}{L_{t103} + L_{r(11\%)}}} = 0,176 + \frac{1}{\frac{1}{0,503} + \frac{1}{0,519 + 0,605}}$$

$$L = 0,523 \text{ mH} = 5,23 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

Velikost kapacity jednoho kompenzačního stupně

$$C = \frac{Q}{\omega U_n^2} = \frac{2500 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 6000^2} = 2,21 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

Rezonanční frekvence pro různý počet sepnutých stupňů

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{5,23 \cdot 10^{-4} \cdot 2,21 \cdot 10^{-4}}} = 468 \text{ Hz}$$

$$f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{5,23 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 2,21 \cdot 10^{-4}}} = 331 \text{ Hz}$$

$$f_{r3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{5,23 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 2,21 \cdot 10^{-4}}} = 270 \text{ Hz}$$

$$f_{r4} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{5,23 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 2,21 \cdot 10^{-4}}} = 234 \text{ Hz}$$

Zvýšení napětí na kondenzátorech vlivem předřazení reaktoru

$$p = \frac{\omega L_{r(1,6\%)}}{1/\omega C} = \frac{0,0554}{1/2\pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot 2,21 \cdot 10^{-4}} = 1,539 \cdot 10^{-2}$$

$$U_c = \frac{U}{1-p} = \frac{6000 \cdot 1,057}{1-1,539 \cdot 10^{-2}} = 6,441 \text{ kV} \text{ tedy } 107,4\% \text{ 6 kV}$$

Protože velikost vypínacího kapacitního proudu odpínače NALF 12 kV je 150 A ($I_n = 240 \text{ A}$), bude přepínání stupňů řešeno vypnutím vypínače 12 kV, 1250 A (umístěného v kobce a předřazeného kompenzacím) a následným zapnutím nebo vypnutím odpínačů (odpínače budou plnit funkci odpojovačů).

Celková indukčnost pro určení frekvence přechodného proudu při spínání

$$L = L_s + L = 0,0414 + 0,523 = 0,5644 \text{ mH}$$

Největší amplituda spínacího proudu nastane při sepnutí jednoho stupně

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,5644 \cdot 10^{-3} \cdot 2,21 \cdot 10^{-4}}} = 450 \text{ Hz}$$

$$I_p = \frac{f_0}{f} I_n = \frac{450}{50} \cdot 240 = 2,16 \text{ kA}$$

Jak první amplituda, tak frekvence přechodného proudu je malá a nebude mít nepříznivý vliv na vypínač (cca 15 kA a 2 kHz).

Reaktor **6 kV; 1,6%; 1000 A** je vhodně zvolen vzhledem k omezení zkratového proudu, odsávání signálu HDO i ke zvýšení napětí na kondenzátorech. Zvýšení napětí bylo počítáno pro zapnuté 4 stupně. Ve většině případů by měly být sepnuté 2 až 3 stupně, tudíž napětí na

kondenzátorech bude o něco menší. Současně reaktor slouží jako spínací reaktor, tedy k omezení spínacích proudů kondenzátorů.

Stávající reaktory podniku s parametry $U_n = 6 \text{ kV}$, $I_n = 600 \text{ A}$, $u_k = 8\%$ by nebylo možno využít k omezení zkratového proudu, protože při sepnutí dvou stupňů kompenzace by obvod byl naladěn na frekvenci 178 Hz, což by bylo blízko frekvenci vysílaného signálu HDO (183,3 Hz). Použitím tohoto omezovacího reaktoru by také napětí na kondenzátorech bylo cca o 13% (sepnuté 2 stupně) vyšší než jmenovité napětí 6 kV a tedy by jeho předřazení vedlo k dalšímu zvýšení napětí a snížení životnosti kondenzátorů, které již bez předřazeného reaktoru budou namáhány cca 105,4% jmenovitého napětí 6 kV. Omezení reaktorů je také v jejich jmenovitém proudu (možnost provozu pouze se dvěma sepnutými stupni).

8. 4 NÁVRH KABELU PRO PŘIPOJENÍ KOMPENZACÍ

Hlavními kritérii pro návrh kabelu jsou dovolené oteplení provozním a zkratovým proudem. Dle normy ČSN 381754 se kabely, či přístrojové transformátory napětí a proudu dimenzují na skutečný čas působení zkratového proudu, kdežto instalované přístroje (odpínače, vypínače) by měly mít odolnost na velikost zkratového proudu a zkratový proud by neměl být přepočítáván na skutečnou dobu působení.

Jmenovitý proud jednoho stupně

$$I_n = \frac{Q}{\sqrt{3}U_n} = \frac{2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 240 \text{ A}.$$

Dle normy CEI 33-7 a IEC 871-1/2 je stanoveno, že kondenzátorové baterie musí být schopny správné funkce při přetížení s efektivní hodnotou proudu do $1,3I_n$, bez ohledu na přechodné jevy. Spínací, ochranná a připojovací zařízení musí být proto navržena tak, aby snesla trvale 1,3 násobek proudu, který by byl při jmenovitém sinusovém napětí a jmenovitém kmitočtu. Podle efektivní hodnoty kapacity, která může být také 1,1 násobek jmenovité hodnoty, může mít tento proud $1,3 \times 1,1 = 1,41$ násobek jmenovitého proudu.[24]

Proud pro dimenzování zařízení volíme $1,3I_n$ neboť kapacity kondenzátorových baterií jsou téměř ve všech případech nižší (viz Tab. 8-1)

$$I_{1(1,3)} = 1,3I_n = 1,3 \cdot 240 = 312 \text{ A}.$$

Velikost zkratového proudu za omezujícím reaktorem je $I_k'' = 30 \text{ kA}$ a tedy potřebnou velikost průřezu kabelu určíme dle prospektu k VN kabelům 10-CXEKCY od firmy DRAKA [23]

Doba působení zkratového proudu je dána nastavením ochran a je $t_{k2} = 0,3 \text{ s}$. Z prospektu volíme kabel o průřezu 120 mm^2 . Protože je proudová zatížitelnost kabelu při provozní teplotě 65°C pro daný průřez 336 A ($I = 312 \text{ A}$), můžeme počítat zkratový proud pro tuto teplotu.

$$I_{k2}'' = \sqrt{\frac{(I_{k1}'')^2 t_{k1}}{t_{k2}}} = \sqrt{\frac{19,0^2 \cdot 1}{0,3}} = 34,7 \text{ kA}$$

Námi navržený kabel 10-CXEKCY 1x120 mm² vyhoví jak na provozní, tak na zkratový proud.

Jelikož pojistky CMF 7,2 kV, 250 A odpínače NALF 12 kV omezují dynamický zkratový proud, stačí od odpínače ke kondenzátorům vést kabel navržený pouze na velikost provozního proudu. Budeme volit kabel 10-CXEKCY 1x95 mm² [23].

Umístění stávajících kompenzací na rozvodnách 6 kV (R201 a R202) ukazuje Příloha 17.

9. NÁVRH NOVÉHO KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

Od zadavatele zakázky bylo řečeno, že všechny generátory dodávající, jak činný, tak jalový výkon, budou odstaveny a elektrická energie bude do rozvodu 6 kV dodávána výhradně ze sítě 110 kV.

9.1 POTŘEBNÁ HODNOTA KOMPENZAČNÍHO VÝKONU

Potřebný jalový výkon určíme z velikosti transformátorů 110/6,3 kV. Je potřeba určit takový maximální možný odebíraný výkon, při kterém nebude přetěžován žádný z paralelně řazených transformátorů T101 a T103 (T102 a T104).

Při plném zatížení transformátoru T101 (T102) bude odebírán proud

$$I_{T101} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{35 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 3208 \text{ A}$$

Maximální odebíraný proud přes transformátor T103 (T104)

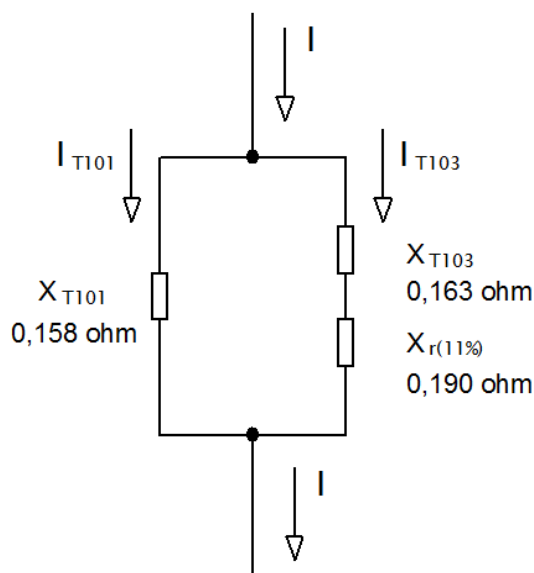
$$I_{T103} = \frac{I_{T101}X_{T101}}{X_{T103} + X_{r(11\%)}} = \frac{3208 \cdot 0,158}{0,163 + 0,190} = 1436 \text{ A}$$

Maximální odebíraný výkon přes transformátor T103 (T104)

$$S_{T103} = \sqrt{3}U_n I_{T103} = \sqrt{3} \cdot 6300 \cdot 3208 = 15,7 \text{ MVA}$$

Maximální možný odebíraný výkon přes transformátory T101 a T103 (T102 a T104)

$$S = S_{T101} + S_{T103} = 35,0 + 15,7 = 50,7 \text{ MVA}$$



Obr. 9.3: Paralelní spolupráce transformátorů T101 a T103 do rozvodny R201

Pro návrh kompenzace budeme brát v úvahu, že maximální odebíraný výkon do rozvodu 6 kV bude 51 MVA. Z měření činných a jalových výkonů, volíme, jak bylo již zmíněno výše, účinník odběru $\cos\varphi = 0,88$.

Maximální možný odebíraný činný výkon při daném účinníku

$$P = S \cos \varphi = 51 \cdot 0,88 = 45 \text{ MW}$$

Pro výpočet kompenzačního výkonu vyjdeme jako v 8. kapitole ze vztahu (8.1)

Maximální potřebný kompenzační výkon pak bude

$$Q_k = P(tg \varphi - tg \varphi_k) = P(tg(\arccos(\cos \varphi)) - tg(\arccos(\cos \varphi_k)))$$

$$Q_{k \max} = 45 \cdot (tg(\arccos(0,88)) - tg(\arccos(0,95))) = 9498 \text{ kVAr}$$

$$Q_{k \max(\cos \varphi=1)} = 24,3 \text{ MVar}$$

Minimální potřebný kompenzační výkon vypočteme z minimálního odebíraného činného výkonu, který volíme s ohledem na provedená měření a na charakter podniku 8 MW (plyne z použité technologie).

Minimální potřebný kompenzační výkon

$$Q_{k \min} = 8 \cdot (tg(\arccos(0,88)) - tg(\arccos(0,95))) = 1688 \text{ kVAr}$$

$$Q_{k \min(\cos \varphi=1)} = 4,3 \text{ MVar}$$

Jelikož velikost účinníku má být udržována v rozmezí 0,95-1 volíme maximální kompenzační výkon 10 MVar ($\cos \varphi = 0,953$) a minimální kompenzační výkon 2 MVar ($\cos \varphi = 0,96$). Protože je rozvodna 6 kV blízko společného napájecího bodu, není potřeba volit vyšší hodnotu maximálního kompenzačního výkonu.

9.2 VLIV NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ KVALITY ELEKTŘINY

Krátkodobé měření velikosti sdruženého napětí na R201 vykazuje hodnoty v rozmezí 105,3% až 106% (105,7%) jmenovitého napětí 6 kV. Pro kondenzátory s přímým připojením na hladinu 6 kV, které mají jmenovité fázové napětí 3,465 kV, to znamená trvalé přetížení o 5,3% až 6% (5,4%).

Krátkodobé měření velikosti sdruženého napětí na R202 vykazuje hodnoty v rozmezí 104,13% až 106,6% (105,4%) jmenovitého napětí 6 kV a tedy trvalé přetížení o 4,1% až 6,6% (5,4%).

Vzhledem k velikosti napětí na rozvodnách 6 kV budeme volit kondenzátory s dostatečnou napěťovou rezervou např. 4,2 kV (7,275 kV).

Velikost celkového harmonického zkreslení napětí THD_U na rozvodnách R201 a R202 je velmi malá. Stejně tak i velikost harmonických napětí a proudů je minimální s nejvyšší 4. harmonickou pocházející ze signálu HDO. Jak celkové THD_U , tak i signál HDO nebude mít vliv na statickou kompenzaci. Zvolená kompenzace tedy bude stupňovitě spínaná s prostými kondenzátory.

9.3 VOLBA VELIKOSTI A POČTU STUPŇŮ

Po konzultaci s firmou Kompel je z ekonomického hlediska a k přihlédnutí nepříliš velké proměnlivosti odebíraného jalového výkonu během dne, vhodné regulovat jalový výkon ve

třech stupních. Celkový potřebný kompenzační výkon 10 MVar bude rozdělen do stupňů v poměru 1:2:4 na každou rozvodnu (R201, R202).

Tab. 9-1: Rozdělení výkonů do jednotlivých stupňů

Stupeň [-]	1	2	3
Q [MVar]	1,429	2,857	5,714

Spínání stupňů podle aktuální potřeby kompenzačního výkonu bude řízeno regulátorem jalového výkonu Novar 1206. Napětí a proud bude měřen na VN straně napájecích transformátorů 110/6,3 kV. Pro měření napětí je potřeba využít MTN se sekundárním napětím 100 V a MTP se sekundárním proudem 5A nebo 1A. Volíme např. 2x dvoupólový MTN 7000/100 V, TP 0.2, a pro měření proudu MTP 3200/5 A, TP 0.2 a MTP 2300/5A TP 0.2. Výkon by se volil dle vzdálenosti od kompenzací.

Jelikož velké třífázové kondenzátorové baterie by se přehřívaly a nebyla by možnost kontrolovat nesymetrii a tím pádem při poruše některých svitků by byly přetěžovány ostatní kondenzátory, budou v jednotlivých stupních umístěny jednofázové kondenzátorové baterie zapojené do dvojité hvězdy. Mezi uzly jednofázových baterií bude umístěn proudový transformátor 10/5A pro registraci proudu způsobeného nesymetrií (poruchou svitků kondenzátorové baterie), jenž bude vyhodnocován balanční ochranou ETASym 3C. Na každý kompenzační rozváděč (3 stupně) bude jedna balanční ochrana.

Napětí na R202 je $1,057U_n$ na R201 je $1,054U_n$ (U_n je jmenovitá hodnota napětíové hladiny, tedy 6 kV). Volíme tedy, že napětí na kondenzátorech bude cca $U_c = 1,054 U_n$ jmenovité hodnoty napětí 6 kV. Tedy $U_c = 6,324$ kV.

1. Stupeň

Pro první stupeň volíme 6 jednofázových kondenzátorových baterií 4,2 kV, 315 kVar od firmy ZES SILKO.

Celkový skutečný kompenzační výkon stupně poté bude

$$Q_{k1} = 6 \cdot Q_n \left(\frac{U_c}{U_n} \right)^2 = 6 \cdot 315 \cdot \left(\frac{6324}{4200 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 = 1428,3 \text{ kVar} \quad C_1 = 1,137 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

Proud stupně

$$I_1 = \frac{Q_{k1}}{\sqrt{3}U_c} = \frac{1428,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6324} = 130,4 \text{ A}$$

Dle normy CEI 33-7 a IEC 871-1/2 musí být spínací, ochranná a připojovací zařízení dimenzována minimálně na $1,3I_n$, jak bylo psáno výše (v našem případě je jmenovitý proud stupně 190,5 A, jelikož jsme použili kondenzátory 4,2 kV). Pro dimenzování použijeme 1,41 násobku proudu stupně. $I_{1(1,41)} = 183,9 \text{ A}$

Pro spínání prvního stupně použijeme vakuový stykač VSC 7 400 A [24] s pojistkami CMF 7,2 kV 160A [17] s pomalou charakteristikou gG pro omezení dynamického zkratového proudu. Pro připojení kondenzátorových baterií použijeme kabel 10 – CXEKCY 1x35mm² [23].

Pro připojení stupně volíme kabel 10 – CXEKCY 1x185 mm² [23]. Doba vypnutí zkratu je $t_{k2} = 0,3$ s.

$$I_{k2}'' = \sqrt{\frac{(I_{k1}'')^2 t_{k1}}{t_{k2}}} = \sqrt{\frac{29,3^2 \cdot 1}{0,3}} = 53,5 \text{ kA}$$

2. Stupeň

Ve druhém stupni bude 6 jednofázových kondenzátorových baterií 4,2 kV, 630 kVAr od firmy ZES SILKO.

Celkový skutečný kompenzační výkon stupně poté bude

$$Q_{k2} = 6 \cdot Q_n \left(\frac{U_c}{U_n} \right)^2 = 6 \cdot 630 \cdot \left(\frac{6324}{4200 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 = 2856,6 \text{ kVAr} \quad C_2 = 2,274 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

Proud stupně

$$I_2 = \frac{Q_{k1}}{\sqrt{3}U_c} = \frac{2856,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6324} = 260,8 \text{ A}$$

Pro dimenzování použijeme 1,41 násobek proudu stupně $I_{2(1,41)} = 367,7 \text{ A}$.

Pro spínání stupně použijeme vakuový vypínač od firmy ABB VD4 12 kV, $I_n = 630 \text{ A}$, $I_k = 50 \text{ kA}$ [21]. Pro připojení kondenzátorových baterií použijeme kabel 10 – CXEKCY 1x120 mm² [23]. Čas vypnutí zkratu je $t_{k2} = 0,1$ s. Provedeme kontrolu, zda kabel vydrží zkratový proud (50 kA) po dobu 0,1 s (nejkratší doba vybavení vypínače je 60 – 80 ms).

$$I_{k2}'' = \sqrt{\frac{(I_{k1}'')^2 t_{k1}}{t_{k2}}} = \sqrt{\frac{17,3^2 \cdot 1}{0,1}} = 54,7 \text{ kA}$$

Námi navržený kabel vyhovuje jak na provozní tak na zkratový proud.

Pro připojení 2. stupně volíme jako pro připojení 1. stupně stejný kabel 10 – CXEKCY 1x185 mm² [23].

V poli stupně bude umístěn JTP 400/5 A, 5P20, 2,5 VA pro ochranu zkratovou a nadproudovou typu SPAJ 140 C.

3. Stupeň

Ve třetím stupni bude 12 jednofázových kondenzátorových baterií 4,2 kV, 630 kVAr od firmy ZES SILKO.

Celkový skutečný kompenzační výkon stupně poté bude

$$Q_{k2} = 6 \cdot Q_n \left(\frac{U_c}{U_n} \right)^2 = 12 \cdot 630 \cdot \left(\frac{6324}{4200 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 = 5713,3 \text{ kVAr} \quad C_3 = 4,547 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

Proud stupně

$$I_3 = \frac{Q_{k1}}{\sqrt{3}U_c} = \frac{5713,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6324} = 521,6 \text{ A}$$

Pro dimenzování použijeme 1,41 násobek proudu $I_{3(1,41)} = 735,5 \text{ A}$.

Pro spínání stupně použijeme vakuový vypínač od firmy ABB VD4 12 kV, $I_n = 1250 \text{ A}$, $I_k = 50 \text{ kA}$ [21]. Pro připojení kondenzátorových baterií použijeme dva paralelní kabely 10 – CXEKCY 2x1x120 mm² [23]. Jelikož kabel 1x185 mm² vydrží účinky zkratového proudu 50 kA, není třeba pro dva paralelní kabely 2x1x120 mm² ověřovat účinek zkratového proudu.

V poli stupně bude umístěn JTP 750/5 A, 5P20, 2,5 VA pro ochranu zkratovou a nadproudovou typu SPAJ 140 C.

9.4 NÁVRH SPÍNACÍCH REAKTORŮ

Pro omezení spínacího proudu vřadíme mezi stykač (vypínač) a kondenzátorové baterie reaktor. Z dokumentace použitého stykače je maximální připojovací kmitočet 2500 Hz a vrcholová hodnota proudu 8 kA [24]. Vypínače mívají větší hodnoty proudu a nižší hodnoty kmitočtu (cca 15kA a 2 kHz). Jelikož největší přechodný děj nastane při připínání 3. stupně k prvnímu, spočteme nejprve indukčnost spínacího reaktoru pro tuto variantu a poté ověříme frekvence a první amplitudy přechodného proudu pro jednotlivé varianty sepnutí stupňů.

Kapacita rezonančního obvodu (1. a 3. stupeň)

$$C = \frac{C_1 C_3}{C_1 + C_3} = \frac{1,137 \cdot 10^{-4} \cdot 4,547 \cdot 10^{-4}}{1,137 \cdot 10^{-4} + 4,547 \cdot 10^{-4}} = 9,095 \cdot 10^{-5} \text{ F.}$$

Jelikož amplituda spínacího proudu nesmí překročit 15 kA, můžeme určit frekvenci přechodného děje

$$f_0 = f \frac{I_p}{I_3} = 50 \cdot \frac{15000}{521,6} = 1437 \text{ Hz}$$

Potřebná indukčnost reaktorů

$$2L_r = \frac{1}{C(2\pi f_0)^2} = \frac{1}{9,095 \cdot 10^{-5} (2\pi \cdot 1437)^2} = 0,135 \text{ mH}$$

Volíme do každého stupně spínací reaktor o indukčnosti $L_r = 0,1 \text{ mH}$, 7,2 kV a I_n (250 A, 450 A, 1000 A).

Největší možná velikost první amplitudy I_p spínacího proudu a kmitočet přechodného proudu pro 1. a 3. stupeň

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 9,095 \cdot 10^{-5}}} = 1180 \text{ Hz}$$

$$I_{p1} = \frac{f_0}{f} I_1 = \frac{1180}{50} \cdot 130,4 = 3,078 \text{ kA}$$

$$I_{p3} = \frac{f_0}{f} I_3 = \frac{1180}{50} \cdot 521,6 = 12,311 \text{ kA}$$

Největší možná velikost první amplitudy I_p spínacího proudu a kmitočet přechodného proudu pro 1. a 2. stupeň

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 7,579 \cdot 10^{-5}}} = 1293 \text{ Hz}$$

$$I_{p1} = \frac{f_0}{f} I_1 = \frac{1293}{50} \cdot 130,4 = 3,372 \text{ kA}$$

$$I_{p2} = \frac{f_0}{f} I_2 = \frac{1056}{50} \cdot 367,7 = 6,743 \text{ kA}$$

Největší možná velikost první amplitudy I_p spínacího proudu a kmitočet přechodného proudu pro 2. a 3. stupeň

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,516 \cdot 10^{-4}}} = 914 \text{ Hz}$$

$$I_{p2} = \frac{f_0}{f} I_1 = \frac{914}{50} \cdot 367,7 = 4,768 \text{ kA}$$

$$I_{p3} = \frac{f_0}{f} I_3 = \frac{914}{50} \cdot 735,5 = 9,536 \text{ kA}$$

Navržené reaktory 7,2 kV, 0,1 mH (250 A, 450 A, 1000 A) omezí dostatečně, jak velikost první amplitudy spínacího proudu, tak i jeho frekvenci.

Kontrolu připínání jednotlivých stupňů k síti není potřeba provádět, neboť nejméně příznivé podmínky nastávají při připínání jedné baterie k druhé (viz kapitola 6.2.2).

9. 5 KONTROLA NA ODSÁVÁNÍ SIGNÁLU HDO

Jak bylo psáno již výše, signál HDO je v dané oblasti vysílán na frekvenci 183,3 Hz

Velikost indukčnosti mezi sítí 110 kV a kompenzací bez úvahy spínacích reaktorů

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_{t101}} + \frac{1}{L_{t103} + L_{r(11\%)}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,503} + \frac{1}{0,519 + 0,605}} = 0,3475 \text{ mH} = 3,475 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

Jelikož rezonanční frekvence bude nejbližší signálu HDO při sepnutí všech třech stupňů, pak bude indukčnost mezi sítí 110 kV a kompenzací

$$L = L + \frac{L_r}{3} = 3,475 \cdot 10^{-4} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{3} = 3,808 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

Rezonanční frekvence bude nejnižší při sepnutí všech tříh stupňů a tedy nejbližze signálu HDO, tudíž stačí provést kontrolu jen pro sepnutí všech 3 stupňů

$$f_{r3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3,808 \cdot 10^{-4} \cdot (1,137 + 2,274 + 4,547) \cdot 10^{-4}}} = 289 \text{ Hz}$$

Navržená spínaná kompenzace nebude výrazně odsávat signál HDO. Schéma kompenzačních zařízení a jejich připojení na rozvodny 6 kV (R201 a R202) je v Příloze 18.

10. SESTAVENÍ MODELŮ A OVĚŘENÍ FUNKCE KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SIMULACEMI

10.1 PARAMETRY PRVKŮ SIMULACE

K sestavení modelu a ověření navrženého kompenzačního zařízení využijeme program PSCAD.

Tab. 10-1: Parametry transformátorů 110/6,3 kV [27]

výrobce	číslo	S_n	U_{1n}	U_{2n}	u_k	i_o	ΔP_k	ΔP_o
		[kVA]	[V]	[V]	[%]	[%]	[kW]	[kW]
Škoda	T101, T102	25 000	110 000	6 300	10,20	1,090	190,90	34,10
SGB	T103, T104	35 000	110 000	6 300	13,91	0,041	124,60	12,37

Pro přesné namodelování transformátorů potřebujeme vypočítat jejich poměrnou souslednou reaktanci.

Transformátor T101(T102)

$$x = \frac{\sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_n}\right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n}\right)}}{\frac{U_n^2}{S_n}} = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_n}\right)} = \sqrt{0,102 - \left(\frac{190,9 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^6}\right)} = 0,3712 \text{ p.j}$$

Transformátor T103(T104)

$$x = \frac{\sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_n}\right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n}\right)}}{\frac{U_n^2}{S_n}} = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_n}\right)} = \sqrt{0,1391 - \left(\frac{124,6 \cdot 10^3}{35 \cdot 10^6}\right)} = 0,3682 \text{ p.j}$$

Jako dvojnásobek sousledné reaktance volíme v PSCADu parametr zvaný air core reactance.

Reaktor 6 kV, 2000 A, 11%

Reaktor 6 kV, 1000 A, 1,6%

$$X_{r(11\%)} = 0,190 \, \Omega \quad L_{r(11\%)} = 0,605 \text{ mH}$$

$$X_{r(1,6\%)} = 0,0554 \, \Omega \quad L_{r(1,6\%)} = 0,176 \text{ mH}$$

Síť 110 kV

$$X_s = 0,013 \, \Omega \quad L_s = 0,04138 \text{ mH}$$

Kompenzační výkony v jednotlivých stupních pro nově navržené kompenzace

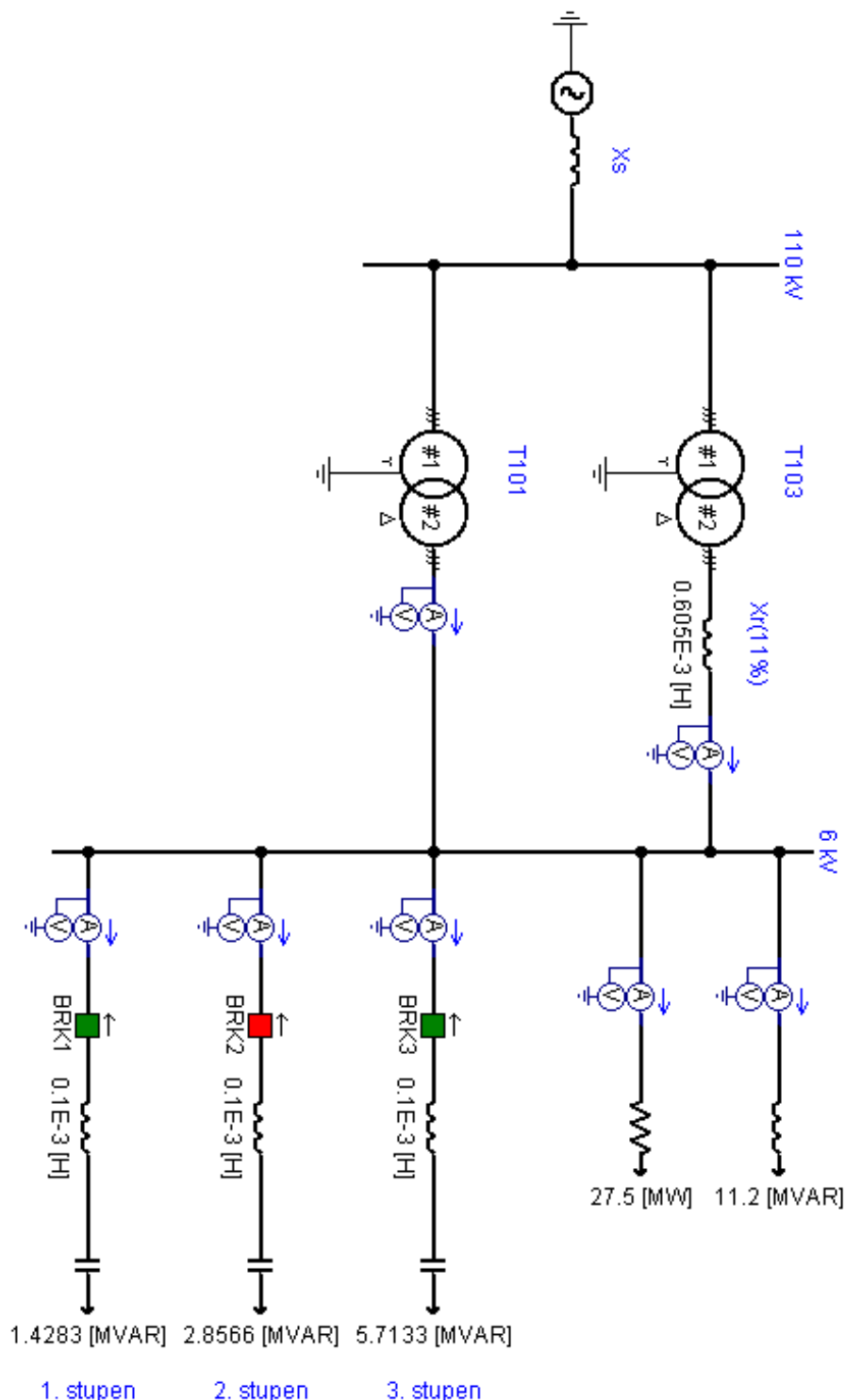
$$Q_{k1} = 1428,3 \text{ kVAr} \quad Q_{k2} = 2856,6 \text{ kVAr} \quad Q_{k3} = 5713,3 \text{ kVAr}$$

$$C_1 = 113,7 \, \mu\text{F} \quad C_2 = 227,4 \, \mu\text{F} \quad C_3 = 454,7 \, \mu\text{F}$$

Kompenzační výkon ve stupni stávajících kompenzací

$$Q_{k1} = 2500 \text{ kVAr} \quad C_1 = 221 \mu\text{F}$$

10.2 OVĚŘENÍ FUNKCE NOVÉHO KOMPENZAČNÍHO ZAŘÍZENÍ



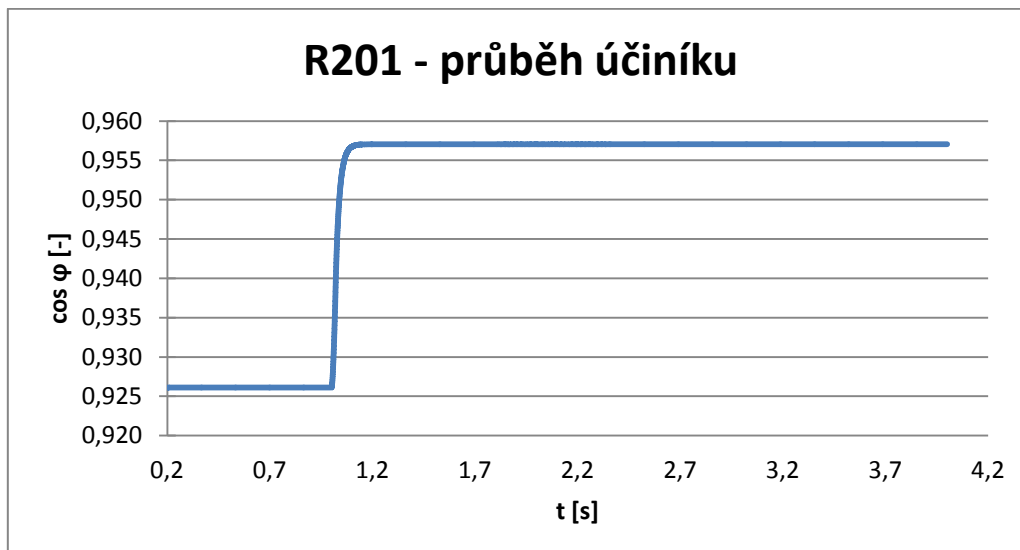
Obr. 10.1: Model sítě petrochemického podniku s instalovanou novou kompenzací

Pro ověření vhodného rozdělení výkonů do jednotlivých stupňů byly zvoleny průměrné hodnoty činného a jalového výkonu na R201

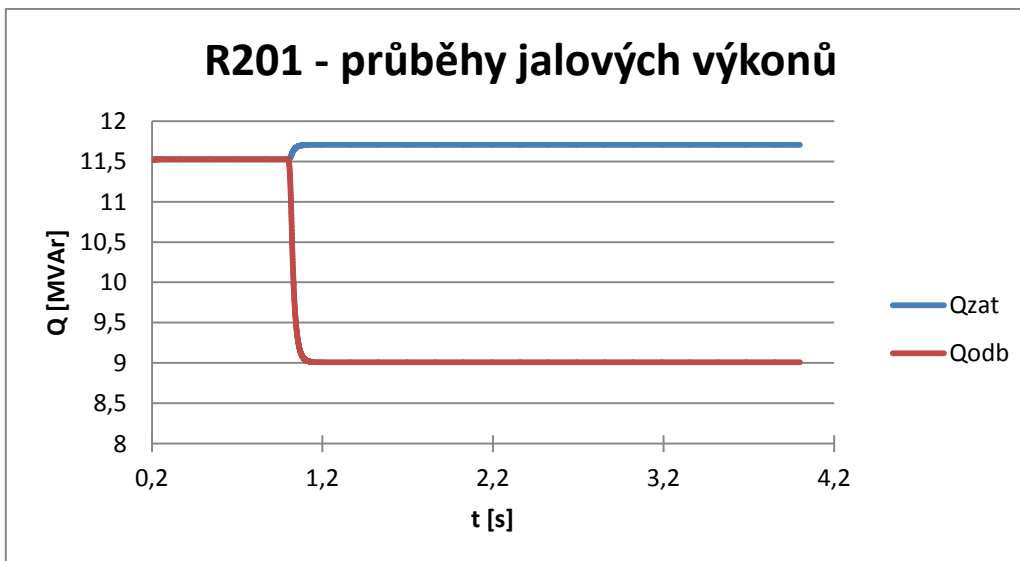
$$P = 27500 \text{ kVAr} \quad Q = 11200 \text{ kVAr.}$$

Hodnoty činného výkonu se během dne mění od této hodnoty v rozmezí cca $\pm 1\%$ a hodnoty jalového výkonu se mění od průměrné hodnoty jalového výkonu v rozmezí cca $\pm 1,3\%$. Jak činný tak i jalový výkon se během dne téměř nemění. Po celý den bude k udržení účinníku (0,95-1) stačit sepnutý druhý stupeň.

Na Obr. 10.2 lze vidět, jak se sepnutím druhého stupně v čase 1s změní účinník



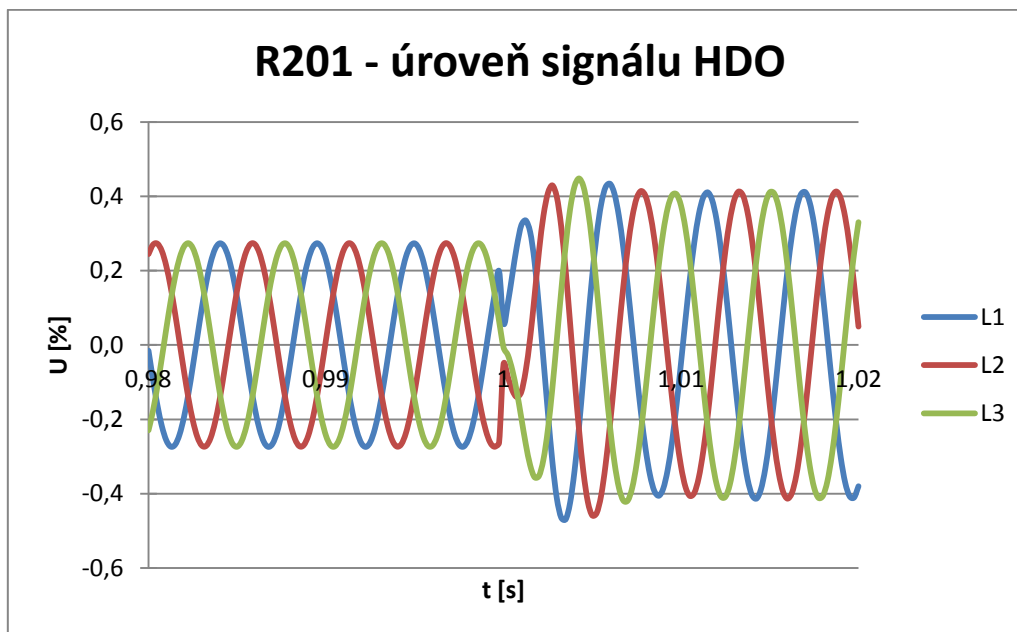
Obr. 10.2: Změna účinníku při sepnutí druhého kompenzačního stupně



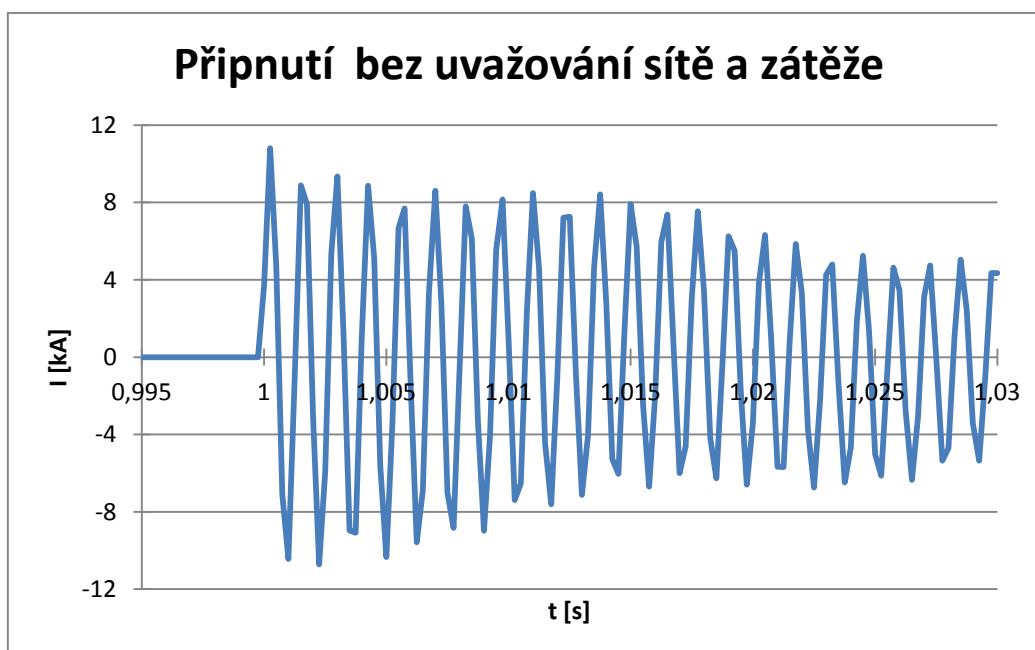
Obr. 10.3: Průběhy odebíraných jalových výkonů

Na Obr. 10.3 lze pozorovat změnu jalového výkonu Q_{odb} odebíraného přes transformátory T101 a T103 při sepnutí 2. stupně kompenzace. V grafu je také vynesena průběh jalového výkonu odebíraného zátěží Q_{zat} , který se při sepnutí kompenzace mírně zvýší, díky většímu napětí na rozvodně 6 kV v důsledku částečného vykompenzování odebírané jalové složky proudu (přes T101 a T103). Na Obr. 10.4 je na sinusovém průběhu o frekvenci vysílaného signálu HDO (183,3 Hz) ukázáno, jak by se při sepnutí (v čase 1 s) všech stupňů kompenzace změnila úroveň signálu HDO. Jak bylo vypočteno již v 9. kapitole, navržená kompenzace

nebude výrazně odsávat signál HDO. Při sepnutí všech stupňů se zvýší úroveň signálu HDO o 0,1% napětí na rozvodně 6 kV (6,324 kV). Tedy z úrovně 0,3% na úroveň cca 0,4%.



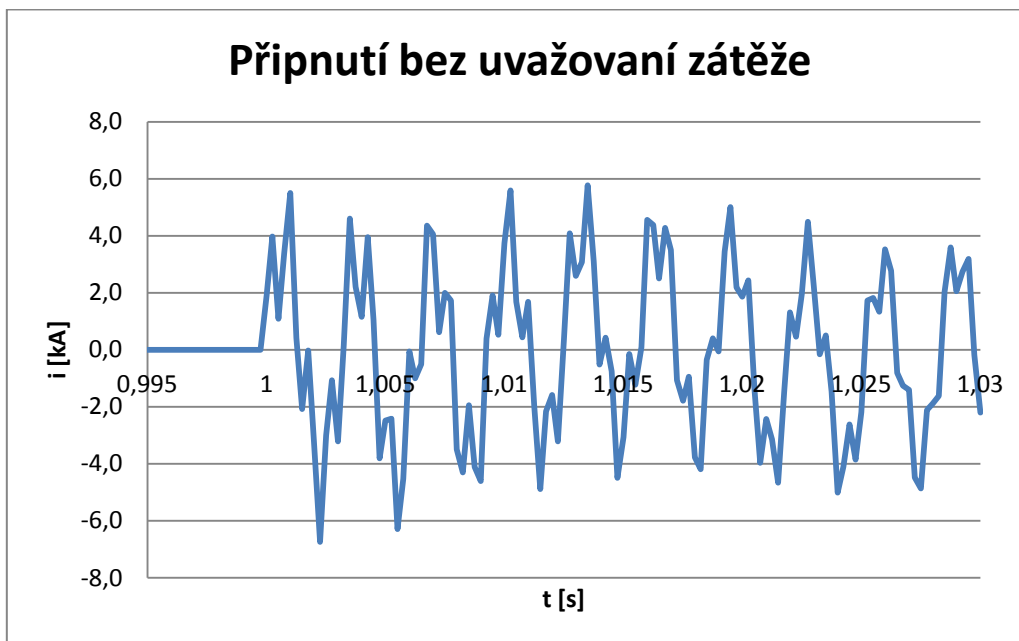
Obr. 10.4: Úroveň signálu HDO při sepnutí všech stupňů kompenzace



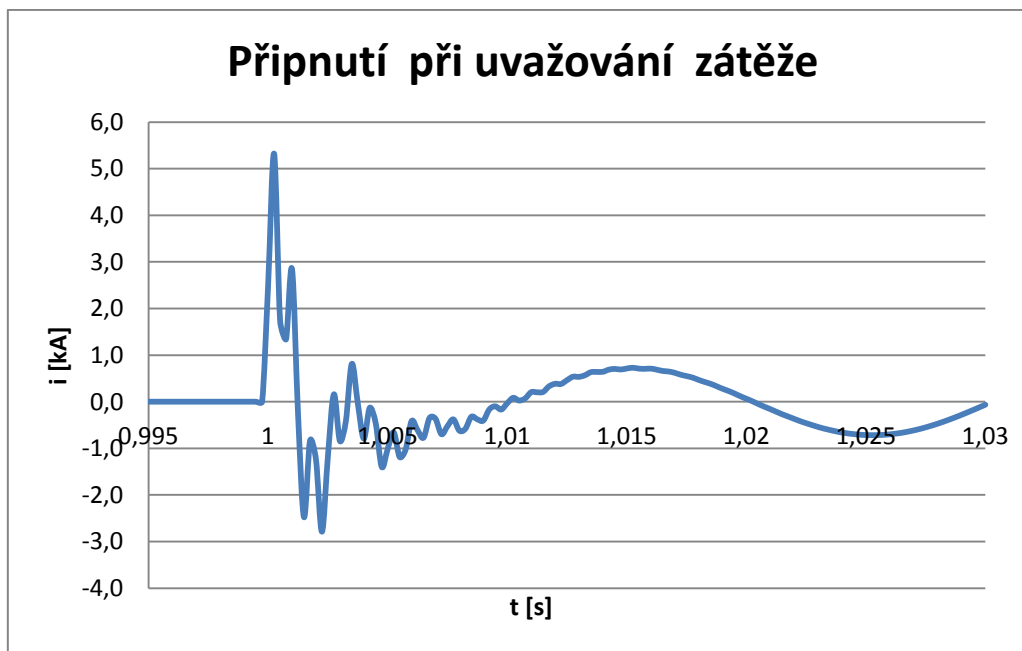
Obr. 10.5: Vliv reaktorů na frekvenci a amplitudu spínacího proudu

V deváté kapitole byly pro novou kompenzaci navrženy spínací reaktory. Nejméně příznivý případ při spínání stupňů nastane, připneme-li k prvnímu stupni stupeň třetí. Pokud bychom připojili 3. stupeň k 1. stupni bez předřazených spínacích reaktorů, velikost první amplitudy spínacího proudu a stejně tak i jeho přechodná frekvence by dosahovaly hodnot, které by ohrožovaly funkci stykače a vypínačů. Pro omezení přechodného děje při sepnutí jsou do každého stupně vřazeny reaktory o indukčnosti 0,1 mH. Obr. 10.5 ukazuje, jak příznivě ovlivní vřazené reaktory první amplitudu i frekvenci spínacího proudu. Největší

možná velikost první amplitudy je cca 11 kA. Na přechodný děj má příznivý vliv reaktance sítě 110 kV a transformátorů 110/6,3 kV a reaktoru 6 kV, 2000A, 11% (Obr. 10.6). Příznivě působí i velikost odebíraného činného výkonu zátěží. Čím větší bude odebíraný činný výkon (menší odpor), tím příznivěji bude omezován přechodný děj (Obr. 10.7)



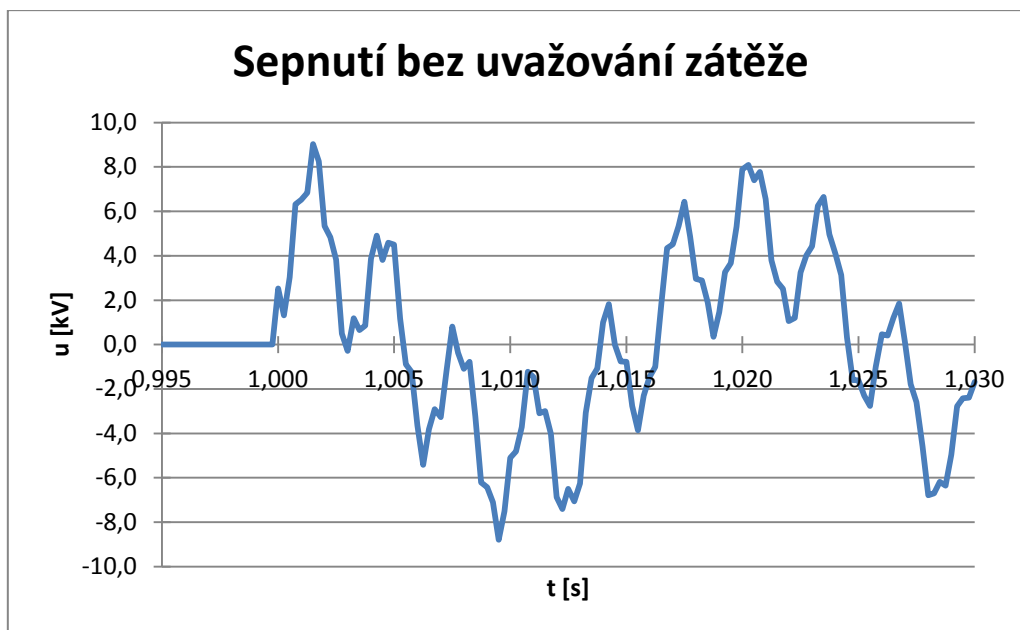
Obr. 10.6: Omezení přechodného proudu při uvažování reaktance sítě (reaktance sítě 110 kV i reaktance napájecích transformátorů 110/6,3 kV)



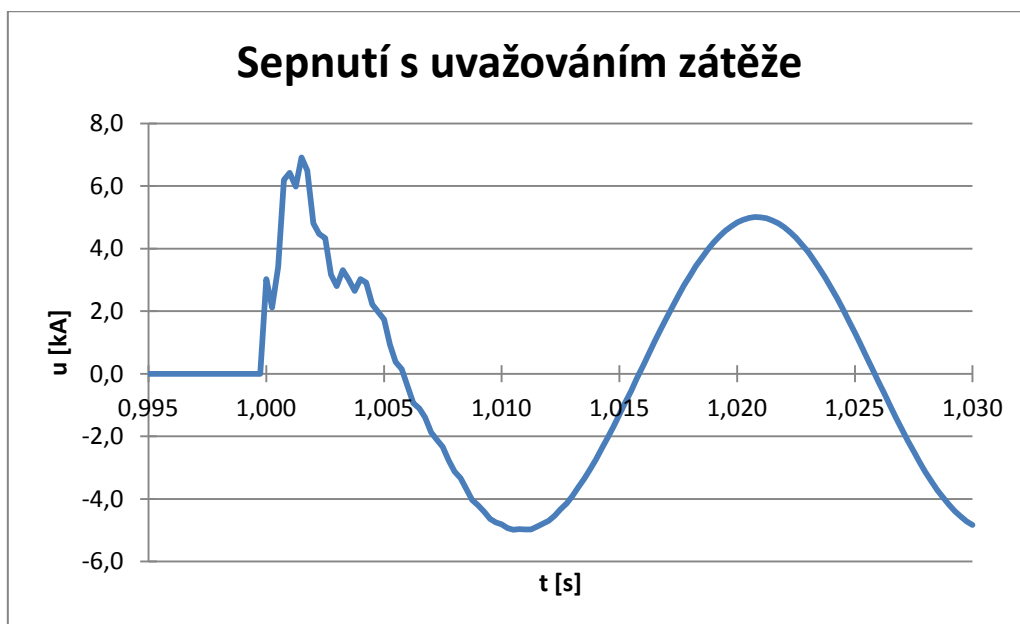
Obr. 10.7: Omezení přechodného proudu při uvažování sítě a zátěže

Při spínání kondenzátorových baterií vzniká také přepětí, které, jak bylo psáno v kapitole 6. 2. 2, nepřesahuje dvojnásobek napájecího napětí, a tudíž není nebezpečným. Průběh napětí při zapínání kondenzátorových baterií je ukázán na Obr. 10.8 a Obr. 10.9.

Podobně jako má příznivý vliv na přechodný proud velikost činného výkonu odebíraného zátěží, tak i průběh přechodného napětí příznivě ovlivňuje velikost zátěží odebíraného činného výkonu.

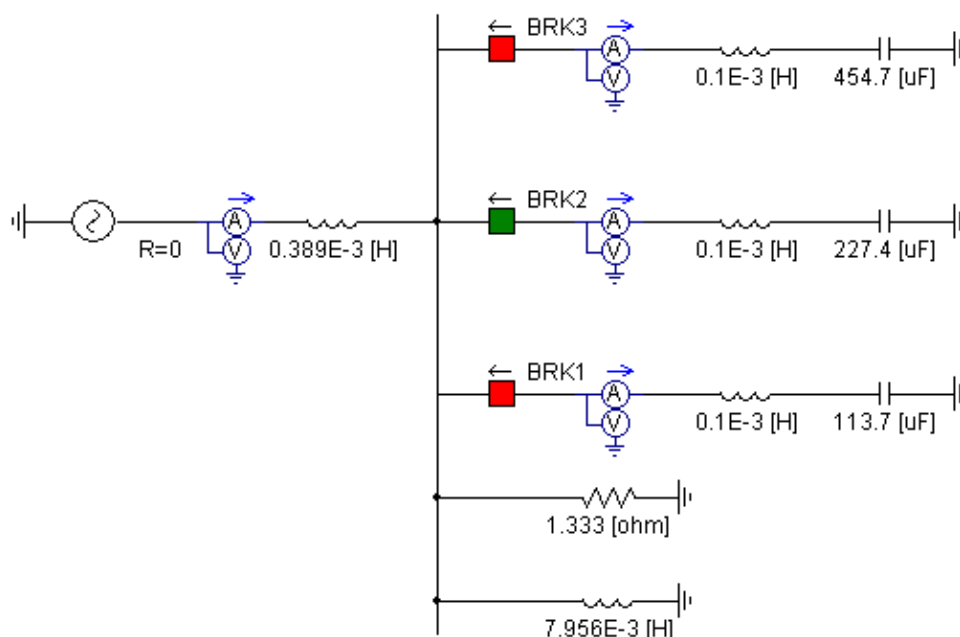


Obr. 10.8: Průběh napětí při sepnutí bez vlivu zátěže



Obr. 10.9: Průběh napětí při sepnutí s příznivým vlivem zátěže

Pro simulaci přechodného děje při spínání byl sestaven jednofázový obvod v programu PSCAD na Obr. 10.10. Při kontrole na odsávání signálu HDO byla simulace provedena pro zátěž $P = 45$ MW a $Q = 24,3$ MVar a při přechodných dějích byla volena zátěž 30 MW (1,333 Ω) a 16 MVar (7,956 mH)

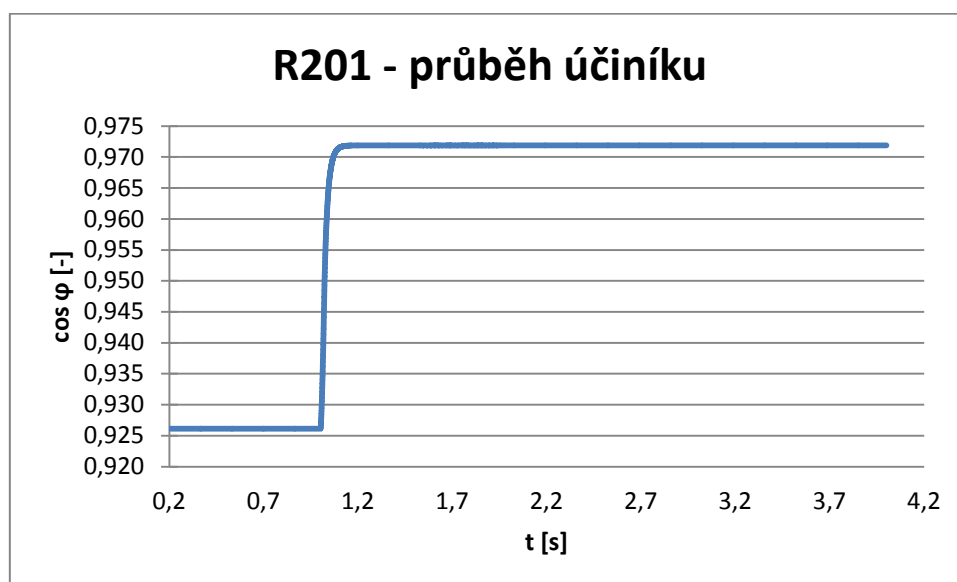


Obr. 10.10: Model pro ověření funkce spínacích reaktorů

10.3 OVĚŘENÍ FUNKCE STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ

Pro ověření vhodnosti rozdělení výkonů do jednotlivých stupňů stávajících kompenzací volíme průměrné hodnoty výkonů na R201 (Příloha 15 a 16) pro namodelování odběru

$$P = 27500 \text{ kVA} \quad Q = 11200 \text{ kVA}.$$

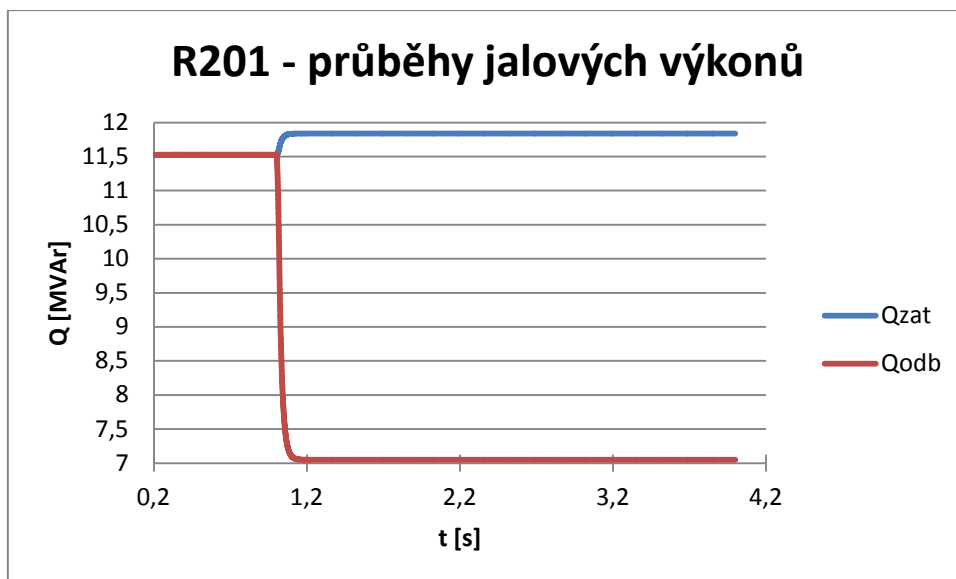


Obr. 10.11: Průběh účinníku při sepnutí 2 stupňů kompenzace

Jak bylo již psáno výše, jalový výkon se během dne téměř nemění a po celý den budou k udržení účinníku (0,95-1) stačit sepnuté dva stupně.

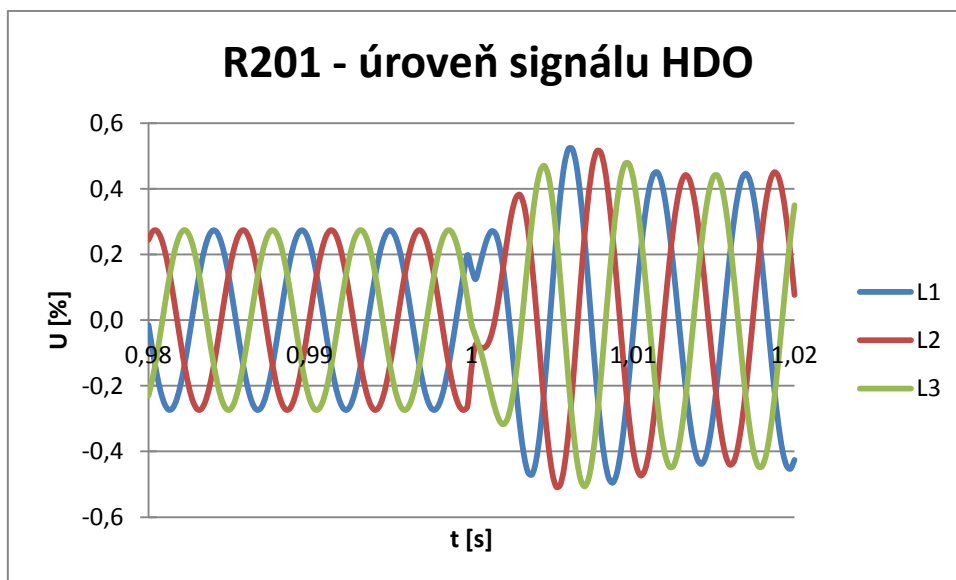
Na Obr. 10.8 lze pozorovat změnu jalového výkonu Q_{odb} odebíraného přes transformátory T101 a T103 při sepnutí 2 stupňů kompenzace. V grafu je také vynesena průběh jalového

výkonu odebíraného zátěží Q_{zat} , který se stejně jako v případě sepnutí stupně nového kompenzačního zařízení mírně zvýší, díky většímu napětí na rozvodně 6 kV v důsledku částečného vykompenzování odebírané jalové složky proudu (přes T101 a T103).



Obr. 10.12: Průběhy odebíraných jalových výkonů

Úroveň signálu HDO (Obr. 10.9) se při sepnutí všech stupňů výrazně nezmění, tudíž signál HDO nebude výrazně odsáván. Jelikož je rezonanční frekvence stávajících kompenzací (s předřazeným reaktorem) blíže frekvenci HDO než je rezonanční frekvence nově navržených kompenzací, lze vidět, že úroveň signálu je po sepnutí o něco málo větší, než při sepnutí nově navržené kompenzace.



Obr. 10.10: Úroveň signálu HDO při sepnutí všech stupňů kompenzace

Pro ověření stávajících kompenzací byl vytvořen v programu PSCAD podobný model jako na Obr. 10.1. Zátěž pro ověření odsávání signálu HDO byla volena stejně jako u nově navržených kompenzací. Vytvořené modely jsou na příloženém CD.

11. ZÁVĚR

Práce je zaměřena na problematiku kompenzace jalového výkonu. Jelikož kompenzace jalového výkonu úzce souvisí s kvalitou elektrické energie, konkrétněji s kvalitou napětí, je stručně těmto pojmům věnována pozornost v třetí kapitole.

V práci je dále rozebrána problematika výkonu a jeho složek odebíraných zátěží jak v prostředí s harmonickými napětími a proudy, tak i v prostředí s výskytem neharmonických napětí a proudů. V prostředí s neharmonickými napětími a proudy pro obecnou zátěž selhává Budeanova teorie, neboť neurčuje správně jak jalový, tak i deformační výkon a tudíž není vhodná v tomto prostředí pro návrh kompenzačního zařízení. V souvislosti s problematikou určení výkonových složek v obvodech s neharmonickými napětími a proudy, je věnována pozornost Czarnického teorii proudových fyzikálních složek (CPC), která dává jasný základ pro návrh kompenzace i v tomto prostředí, tedy jaké množství jalového výkonu je potřeba zátěži dodat.

Následující teoretické kapitoly jsou věnovány důvodům provádění paralelní kompenzace, popisu kompenzačních zařízení používaných v průmyslových sítích NN a VN, a jejich porovnání z hlediska teorie CPC.

Výběr a návrh kompenzačního zařízení závisí na mnoha faktorech, jako je např. prostředí, ve kterém bude zařízení instalováno (lineární, nelineární), velikost a proměnlivost odebíraného jalového výkonu, vyhodnocování účinníku dodavatelem elektrické energie, napětíová hladina, citlivost zařízení instalovaných v okolí na rušení způsobené kompenzačním zařízením, vliv kompenzačního zařízení na kvalitu napětí a v neposlední řadě finanční možnost odběratele. Kompenzační zařízení mívá tedy v mnoha případech značně osobitý charakter.

Z provedených měření jalových výkonů a parametrů kvality elektrické energie postačí pro nahrazení synchronních generátorů stupňovitě spínané kompenzační zařízení s prostými kondenzátory. Stávající kompenzace jsou omezené zkratovou odolností odpínačů NALF 12 kV (30 kA), proto je potřeba omezit zkratový proud vřazením reaktoru 6 kV, 1,6%, 1000 A mezi vypínač a stávající kompenzace. Reaktor současně slouží jako spínací reaktor. Jelikož se během dne téměř nemění odebíraný jalový výkon (účinník), spínání kompenzací vypínačem 12 kV 1250 A, umístěného v kobce, také nevádí. Vzhledem k namáhání kondenzátorů vyšším napětím, než je jejich jmenovité, a vzhledem k jejich minulému provozu přibližně 5 let, se dá očekávat snížení jejich životnosti a zvýšená poruchovost. Přehledné schéma umístění stávajících kompenzací 2x10 MVar na rozvodny 6 kV ukazuje Příloha 17.

Nově navržené kompenzace jsou identické jak pro rozvodnu R201, tak i pro rozvodnu R202. Byla zvolena stupňovitě spínaná kompenzace s prostými kondenzátory chráněnými spínacími reaktory proti přechodným nadproudům při zapínání stupňů. S ohledem na proměnlivost jalového výkonu během dne i po delší období (cca 1 měsíc), byl kompenzační výkon 10 MVar rozdělen do jednotlivých stupňů kompenzace v poměru 1:2:4. V každém stupni jsou instalovány jednofázové kondenzátory v zapojení do dvojité hvězdy pro vyhodnocení nesymetrie balanční ochranou ETASym 3c. Pro ochranu stupňů ovládaných

vypínači je na každý stupeň instalována ochrana SPAJ 140 C. Připojení nově navržených kompenzací 2x10 MVar na rozvodny 6 kV vyobrazuje Příloha 18.

Pro ověření funkčnosti kompenzačních zařízení byl sestaven model v programu PSCAD pro nově navržené i pro stávající kompenzace. V grafech jsou vyneseny průběhy účinníku, průběhy jalových výkonů a pro nově navržené kompenzace jsou vyneseny průběhy proudů a napětí při připínání třetího stupně ke stupni prvnímu.

Stávající kompenzace vzhledem k malé proměnlivosti jalového výkonu postačí k udržení účinníku v rozmezí 0,95-1 ve všech provozních stavech, stejně jako nově navržené kompenzace. Při sepnutí všech stupňů kompenzací (nově navržených tak i stávajících) lze z provedených simulací sledovat zvýšení napětíové úrovně signálu HDO. Rezonanční frekvence při všech sepnutých stupních kompenzací jsou dostatečně vzdálené od kmitočtu vysílaného signálu HDO a neměly by ho výrazněji odsávat. Podniková síť nemá díky malému množství instalovaných nelineárních spotřebičů negativní vliv na kompenzační zařízení. Stejně tak i nízká úroveň signálu HDO nebude mít vliv na instalované kompenzace.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SEDLÁČEK, J., VALSA, J., *Elektrotechnika II* [online]. Brno: VUT v Brně, 186 stran, Skriptum FEKT VUT v Brně.
- [2] RICHTER, A.; KONEČNÁ, E.; RYDLO, P., Harmonické zkreslení napájecí sítě, jeho definice, měření a praxe. In *Harmonické zkreslení napájecí sítě, jeho definice, měření a praxe* [online]. Liberec: TU v Liberci, 200? [cit. 2011-11-14]. Dostupné z WWW: http://www.mti.tul.cz/files/vke/harmonicke_zkresleni.pdf.
- [3] HOLOUBEK, J. Kompenzace jalového výkonu. In *Úvod: sborník přednášek Trutnov 1997* [online]. Trutnov: H. V. K. L Propag team, 1997 [cit. 2011-11-14].
- [4] BLAŽEK, V., SKALA, P., *Distribuce elektrické energie* [online]. Brno: VUT v Brně, 138 stran, Skriptum FEKT VUT v Brně.
- [5] VRBA, J., *Výkonová elektronika 1, usměrňovače, střídavé měniče napětí* [online]. Brno: VUT v Brně, 140 stran, Skriptum FEKT VUT v Brně.
- [6] GAVLAS, J.; KUŽELA, M.; SANTARIUS, P.. Úvod: Kvalita elektrické energie - úvod. In *Úvod: Kvalita elektrické energie-úvod* [online]. Ostrava: FEI TU v Ostravě, 2001 [cit. 2011-11-14]. Dostupné z WWW: http://www.medportal.sk/files/file/lpq_cz/1_1.pdf [překlad]
- [7] DRÁPELA, J., *Kvalita elektrické energie – Charakteristiky napětí* [online]. Studijní materiály předmětu Distribuční a průmyslové sítě, 92 stran, FEKT VUT v Brně.
- [8] DUGAN, R., MCGRANAGHAN, M., SANTOSO, S., BEATY, W., *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill, 2003, 521 stran. ISBN 0-07-138622-X
- [9] ARRILLAGA, J., WATSON, N., R., *Power system harmonics*. Wiley, 2003, 389 stran. ISBN 0-470-85129-5
- [10] *Elektrické stroje* [online] Brno: VUT v Brně, 79 stran, Skriptum FEKT VUT v Brně
- [11] *KBH energy kompenzace jalového výkonu* [online] poslední změna 21. 12. 2011 [cit. 2011 – 12 - 21] Dostupné z WWW: <http://www.kbhenergy.cz/>
- [12] BŮBELA T., KORENC V., PETRŮ C., *Aktivní filtry - obecně* [online] poslední změna 21. 12. 2011 [cit. 2011 – 12 - 21] Dostupné z WWW: <http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/146-aktivni-filtry---obecne.html>
- [13] *Teoretický rozbor kompenzace jalového výkonu* [online] poslední změna 21. 12. 2011 [cit. 2011 – 12 - 21] Dostupné z WWW: http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/10_Pred10MR.pdf
- [14] CZARNECKI, L. S., *Currents' Physical Components (CPC) in Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents Part 1: Single Phase Linear Circuits* [online] Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XI, No. 2 2005 [cit. 2011-12-26]. Dostupné z WWW: <http://www.leonardo-energy.org/repository/Library/EPQU/JVol11No2/czarnecki.pdf>

- [15] CZARNECKI, L. S., *Currents' Physical Components (CPC) in Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents Part 2: Three-Phase Three-Wire Linear Circuits* [online] Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XII, No. 1 2006 [cit. 2011-12-26]. Dostupné z WWW: <http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/737>
- [16] *Vzduchový odpínač typu NAL pro vnitřní montáž* [online] Dostupné z WWW: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/9b83b2a1d52b79b9c125733e002673da/\\$file/nal%20katalog%20cs%202007.08.08.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/9b83b2a1d52b79b9c125733e002673da/$file/nal%20katalog%20cs%202007.08.08.pdf)>
- [17] *Pojistky omezující proud, CEF, Pojistky pro motorové obvody, CMF* [online] Dostupné z WWW: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/12fb5ee8841c0e0bc125733e00398ef0/\\$file/cef_cm%20katalog%20cs%201v1c000027%20r1-2006.01.20.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/12fb5ee8841c0e0bc125733e00398ef0/$file/cef_cm%20katalog%20cs%201v1c000027%20r1-2006.01.20.pdf)>
- [18] ORSÁGOVÁ, J., *Rozvodná zařízení* [online]. Brno: VUT v Brně, 138 stran, Skriptum FEKT VUT v Brně.
- [19] *10-AXEKCY 6/10 (12) kV* [online] Dostupné z WWW: <http://www.draka.cz/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=210&cf_id=50>
- [20] *VN kompenzační rozváděče* [online] Dostupné z WWW: <<http://www.zez-silko.cz/cs/products.aspx?CID=6d>>
- [21] *VD4 Vakuové vypínače vysokého napětí* [online] Dostupné z WWW: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/e925939fbf7f64d3c1257512004410bb/\\$file/CA_VD4-40kA%28CS%29M_1VLC000006.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/e925939fbf7f64d3c1257512004410bb/$file/CA_VD4-40kA%28CS%29M_1VLC000006.pdf)>
- [22] *Kompel, kompenzace účiníku, filtrace harmonických, kompatibilita silnoproudých zařízení* [online] Dostupné z WWW: <<http://www.kompel.cz/>>
- [23] *10-CXEKCY 6/10 (12) kV* [online] Dostupné z WWW: <http://www.draka.cz/images/stories/vn/2/10-cxekcy_6_10_12_kv.pdf>
- [24] *V-contact Vakuové stykače vysokého napětí* [online] Dostupné z WWW: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/be220a170a1397a8c12573980043ca9e/\\$file/ca_vcontact-vsc%28cs%29d_1v1c000165.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/be220a170a1397a8c12573980043ca9e/$file/ca_vcontact-vsc%28cs%29d_1v1c000165.pdf)>
- [25] KOREJČÍK M., *Návrh svodičů přepětí v průmyslovém rozvodu* [online] Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně 2009, 49 stran. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18368>
- [26] VÝVODA M., *Kompenzace účiníku a posouzení zpětných vlivů indukčního ohřevu* [online] Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně 2011, 81 stran. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37829>
- [27] Materiály poskytnuté zadavatelem zakázky
- [28] *Systémy FACTS a HVDC v elektroenergetice* [online]. Studijní materiály předmětu Řízení elektrizační soustavy, 39 stran, FEKT VUT v Brně.

[29] *Statcom for Utility* [online]. Dostupné z WWW:

<<http://www.abb.com/industries/db0003db004333/c12573e7003305cbc1256fef003fad0a.aspx>>

[30] DRÁPELA, J., *Výkony v třífázových sítích s obecně nesymetrickou a deformovanou proudovou a napěťovou soustavou* [online]. Studijní materiály předmětu Kvalita elektrické energie a EMC, 32 stran, FEKT VUT v Brně.

[31] GERT, R., *Provozní přepětí v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL, 1964, 144 stran.

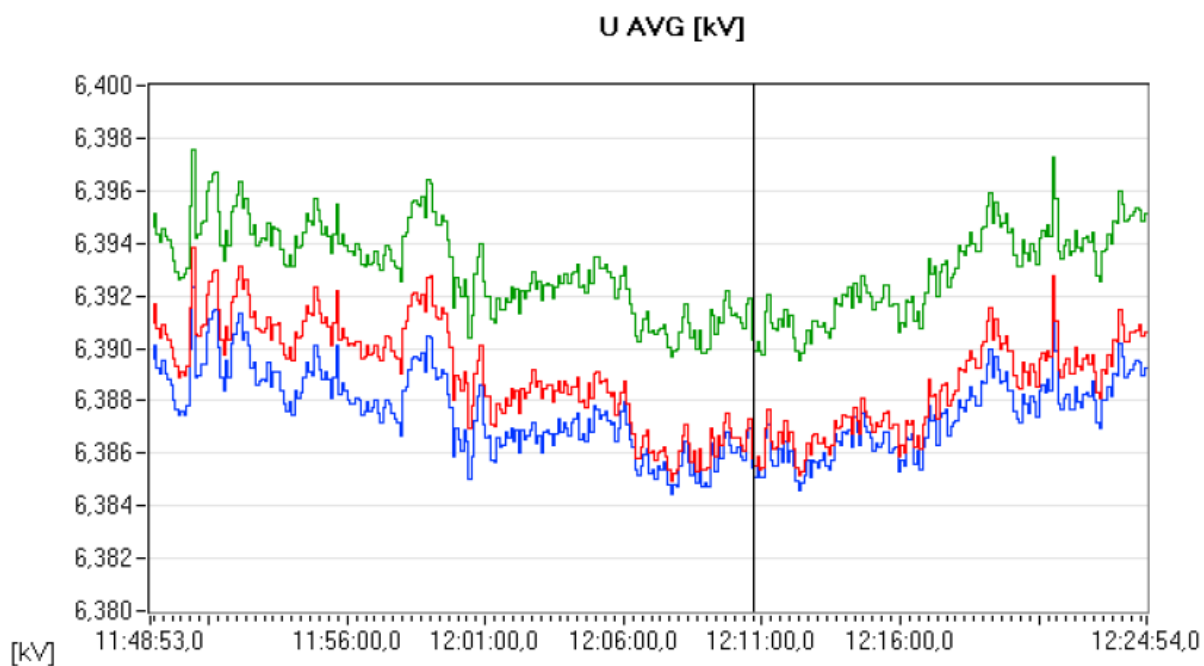
[32] MOLNÁR, M., *Zlepšení účinníku v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků* [online]. Dostupné z WWW:

<<http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf>>

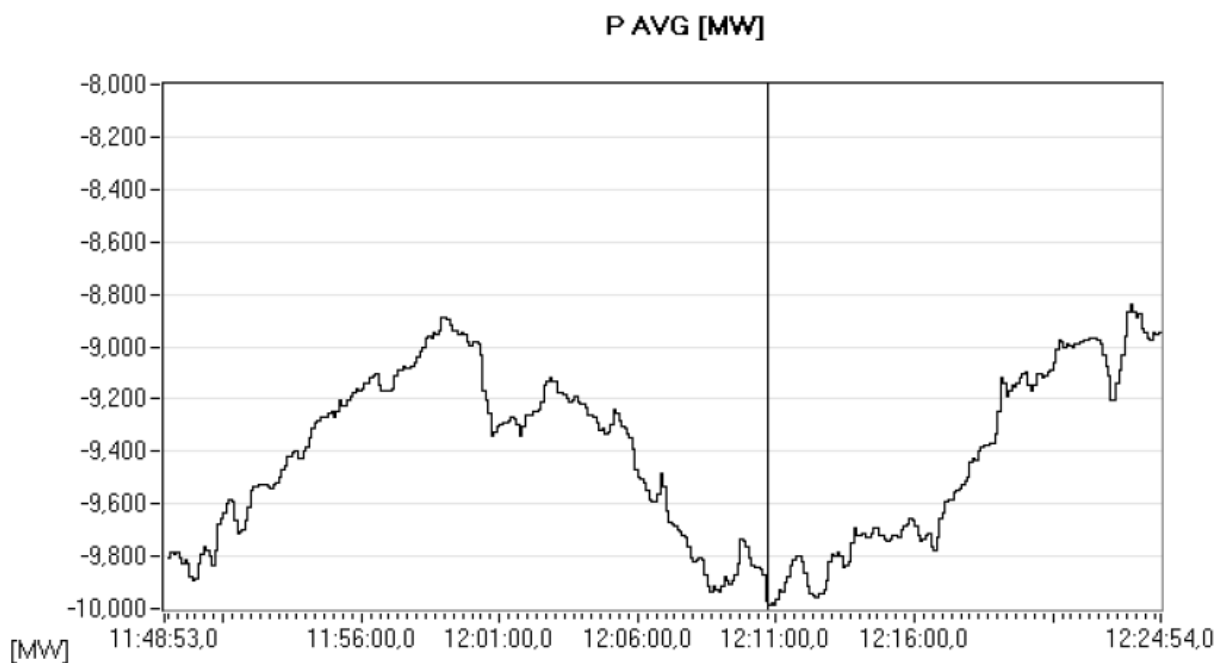
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU GENERÁTORU TG1	I
PŘÍLOHA 2 – JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU GENERÁTORU TG1	II
PŘÍLOHA 3 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU GENERÁTORU TG1.....	III
PŘÍLOHA 4 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T104	IV
PŘÍLOHA 5 – JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T104.....	V
PŘÍLOHA 6 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T104	VI
PŘÍLOHA 7 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU GENERÁTORU TG9....	VII
PŘÍLOHA 8 – JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU GENERÁTORU TG9	VIII
PŘÍLOHA 9 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU GENERÁTORU TG9.....	IX
PŘÍLOHA 10 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T103	X
PŘÍLOHA 11 – JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T103	XI
PŘÍLOHA 12 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T103	XII
PŘÍLOHA 13 – MĚSÍČNÍ PRŮBĚHY ČINNÝCH VÝKONŮ NA R201 A R202 [27]	XIII
PŘÍLOHA 14 – MĚSÍČNÍ PRŮBĚHY JALOVÝCH VÝKONŮ NA R201 A R202 [27]	XIV
PŘÍLOHA 15 – JEDNODENNÍ PRŮBĚHY ČINNÉHO VÝKONU NA R201 R202 [27]	XV
PŘÍLOHA 16 – JEDNODENNÍ PRŮBĚHY JALOVÉHO VÝKONU NA R201 R202 [27]	XVI
PŘÍLOHA 17 – MOŽNÉ PŘIPOJENÍ STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ 2x10 MVar	XVII
PŘÍLOHA 18 – NOVĚ NAVRŽENÉ KOMPENZACE 2x10 MVar.....	XVIII

PŘÍLOHA 1 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU GENERÁTORU TG1

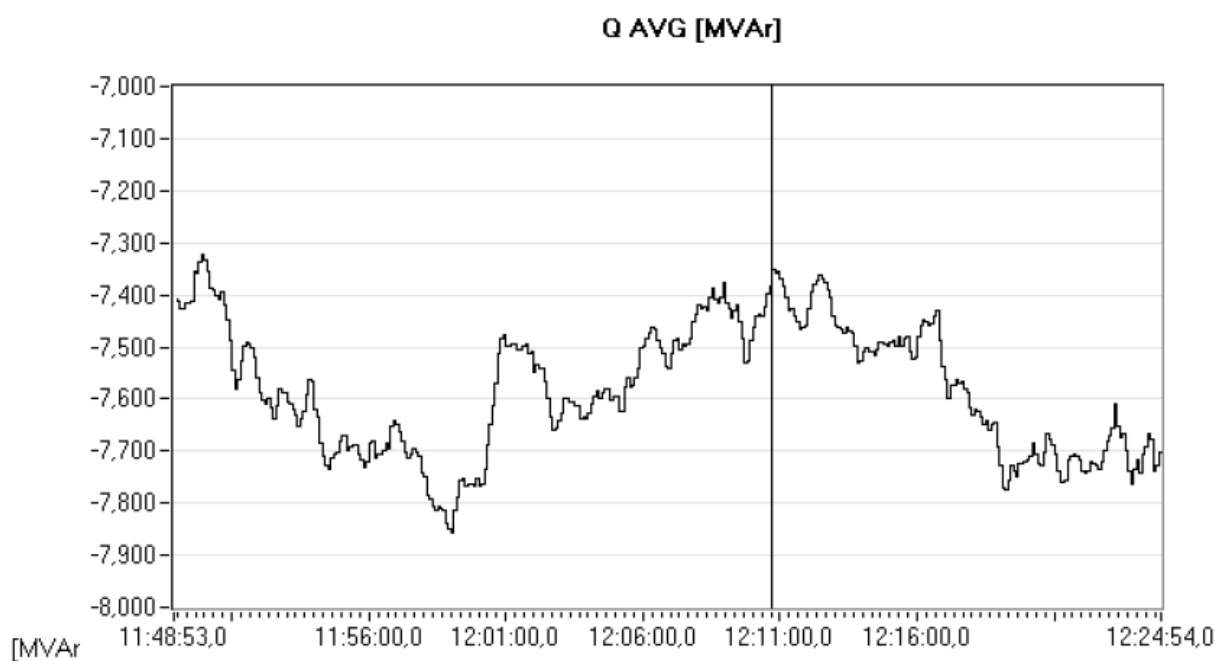


Napětí na vývodu generátoru TG1

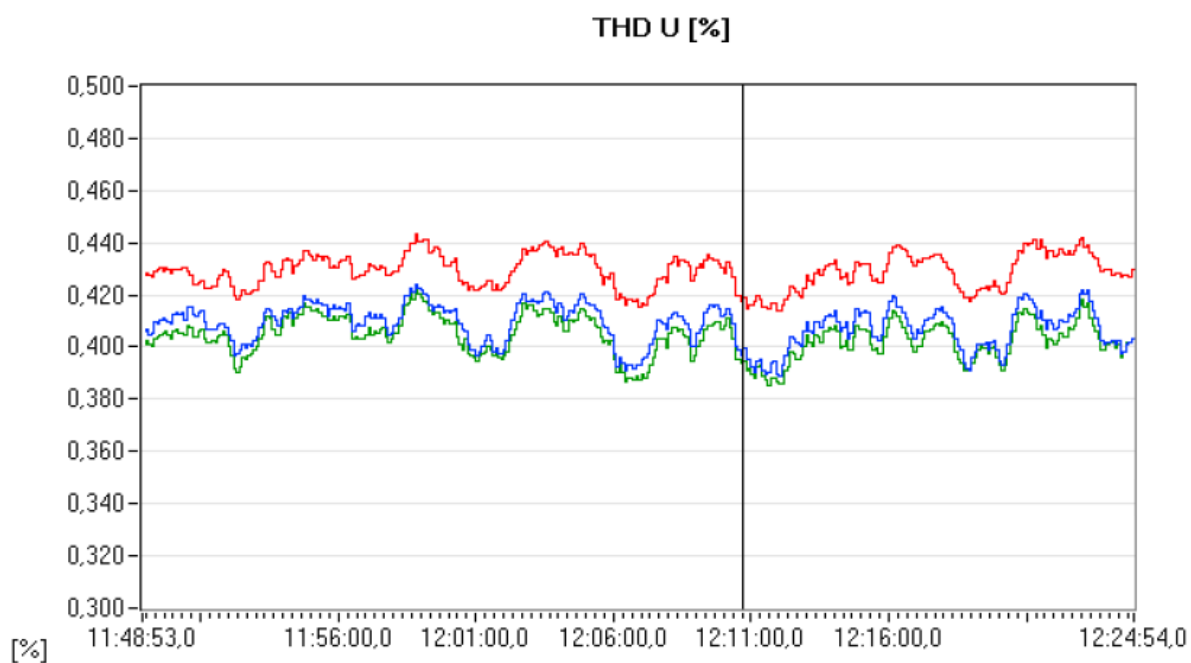


Činný výkon na vývodu generátoru TG1

PŘÍLOHA 2 –JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU GENERÁTORU TG1

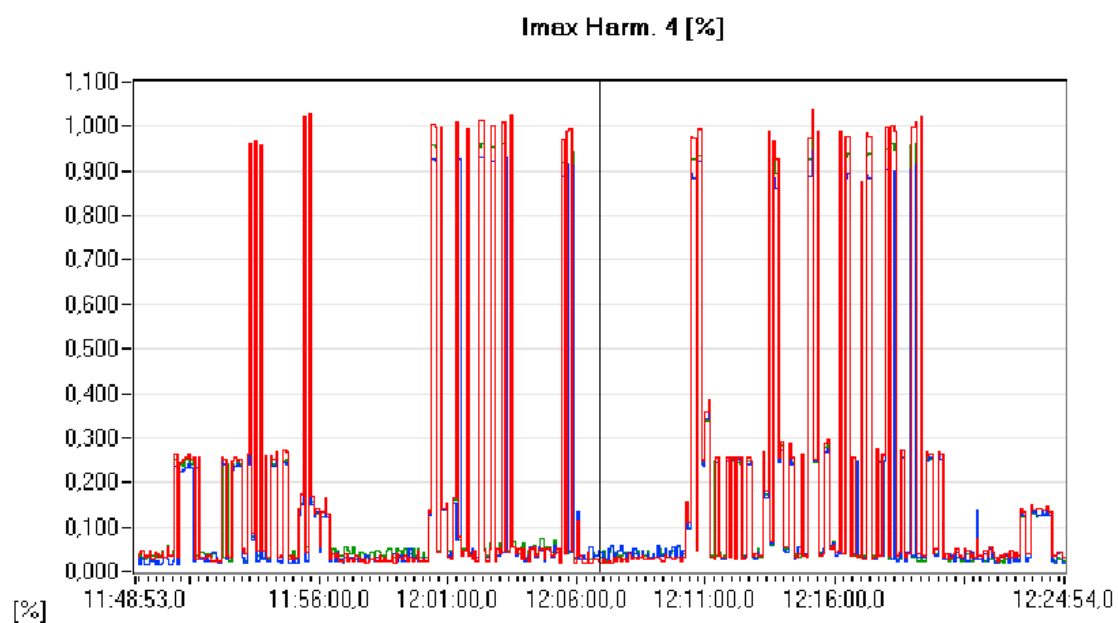
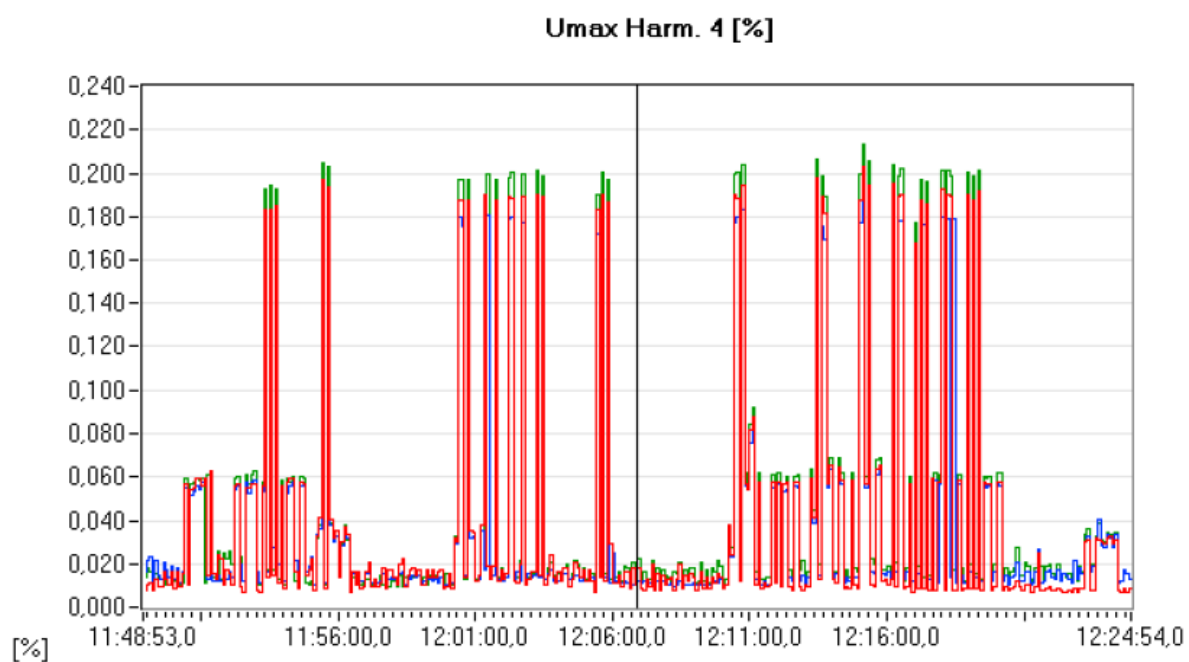


Jalový výkon na vývodu generátoru TG1

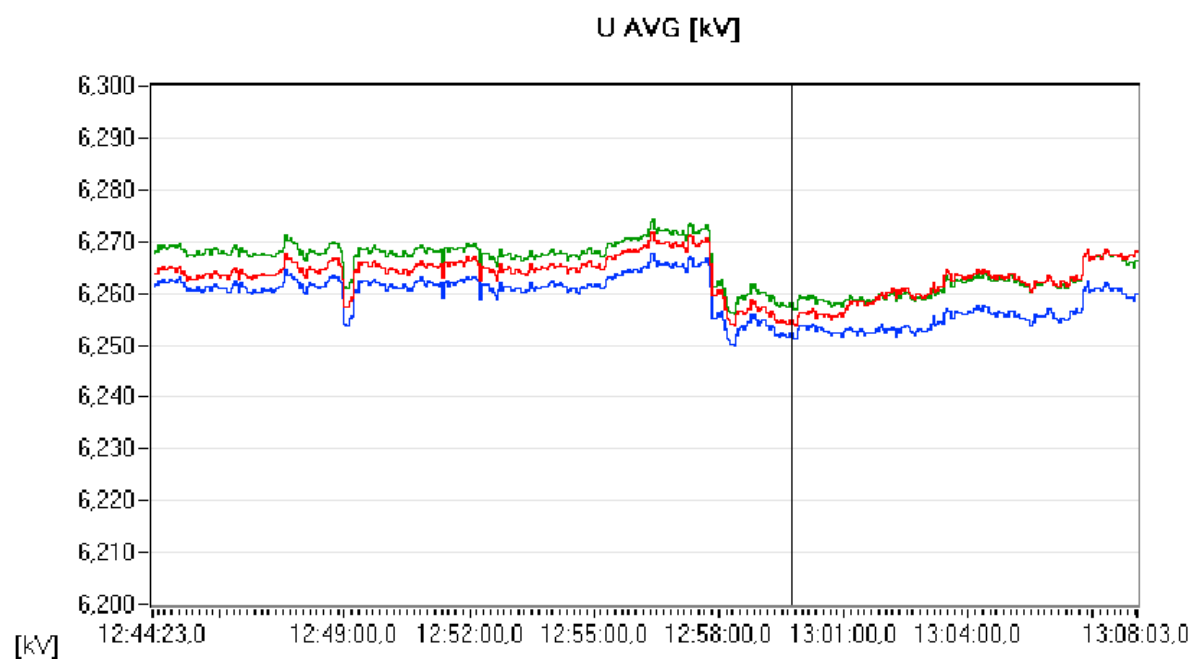


Činitel harmonického zkreslení na vývodu generátoru TG1

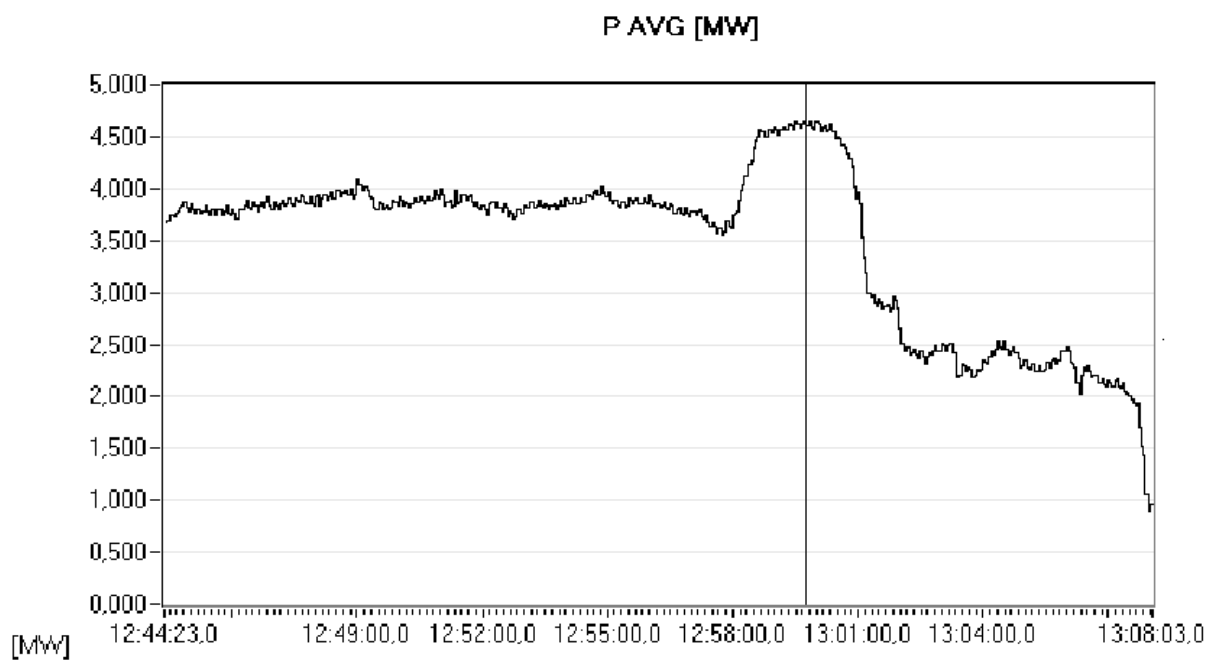
PŘÍLOHA 3 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU GENERÁTORU TG1



PŘÍLOHA 4 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T104

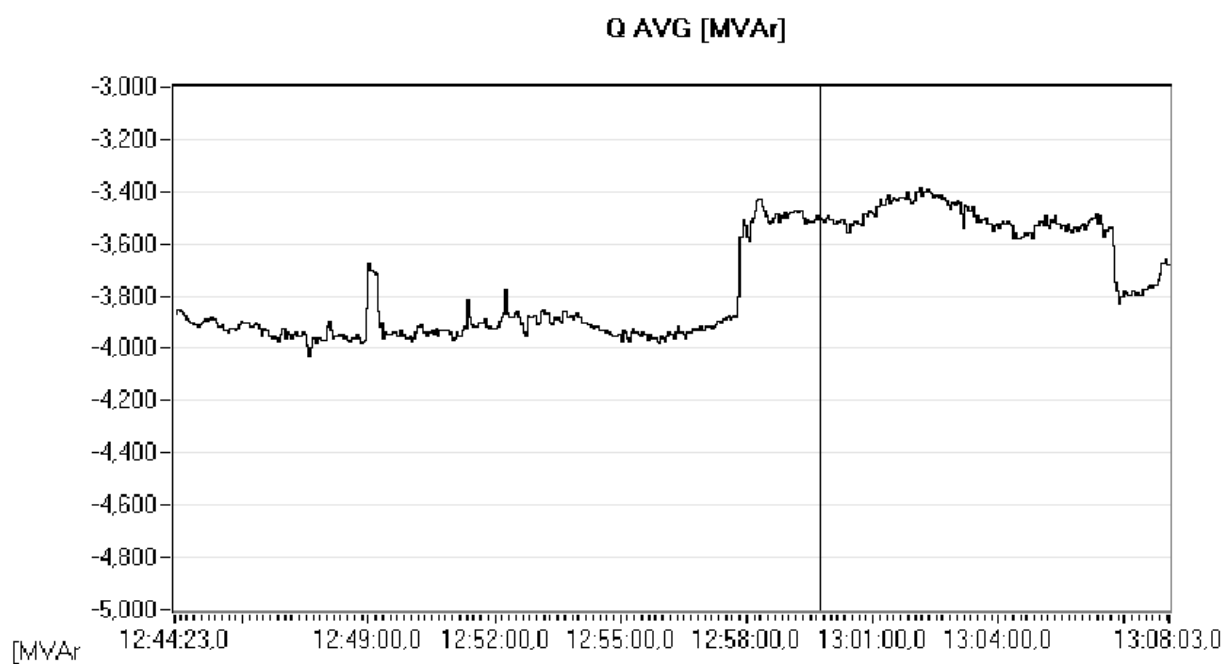


Napětí na vývodu transformátoru T104

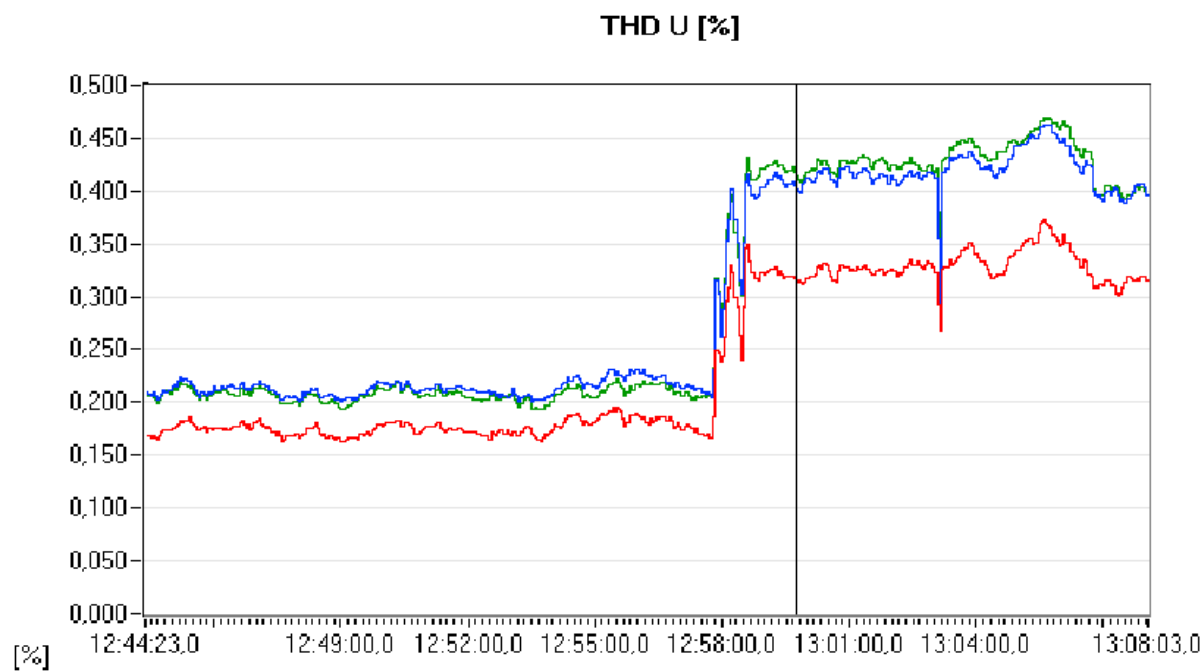


Činný výkon na vývodu transformátoru T104

PŘÍLOHA 5 –JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T104

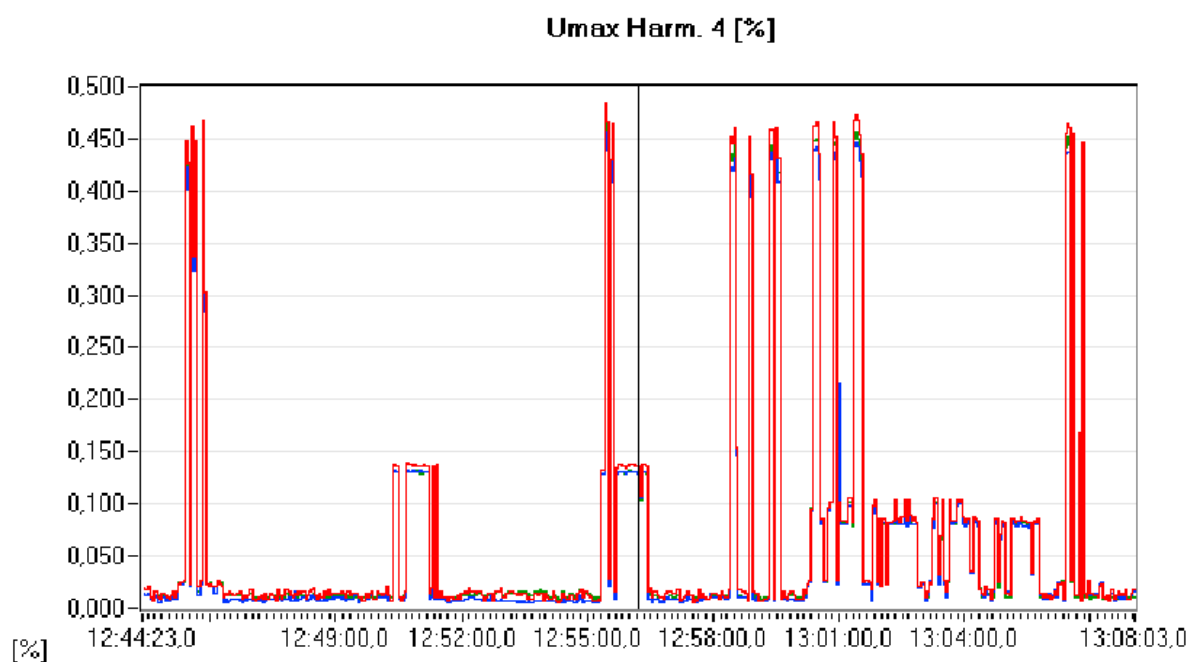


Jalový výkon na vývodu transformátoru T104

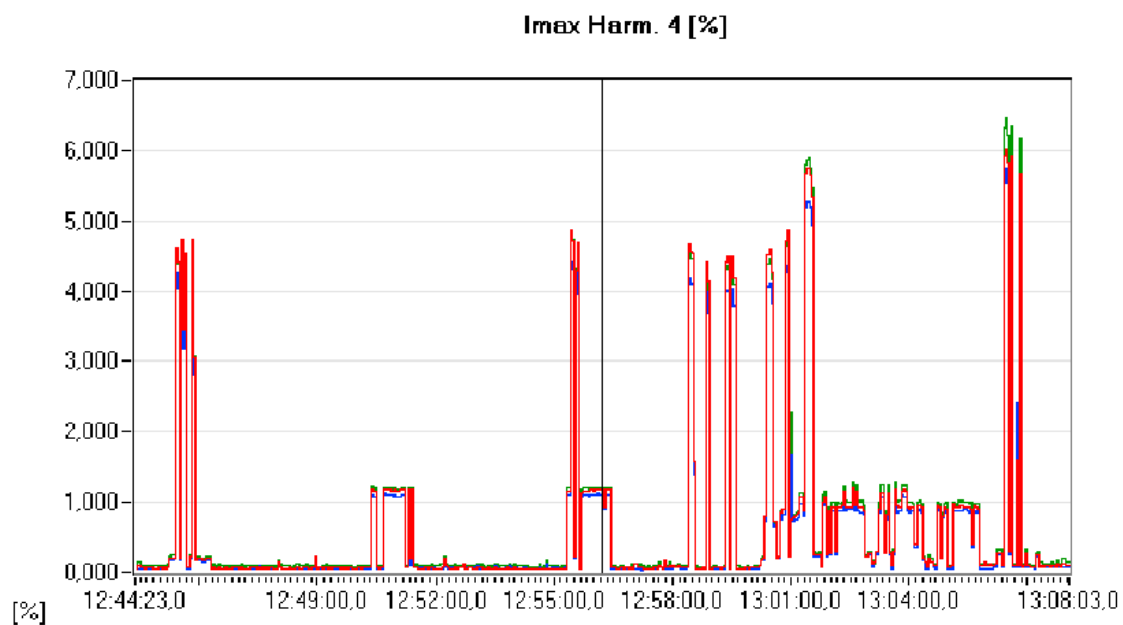


Činitel harmonického zkreslení na vývodu transformátoru T104

PŘÍLOHA 6 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T104

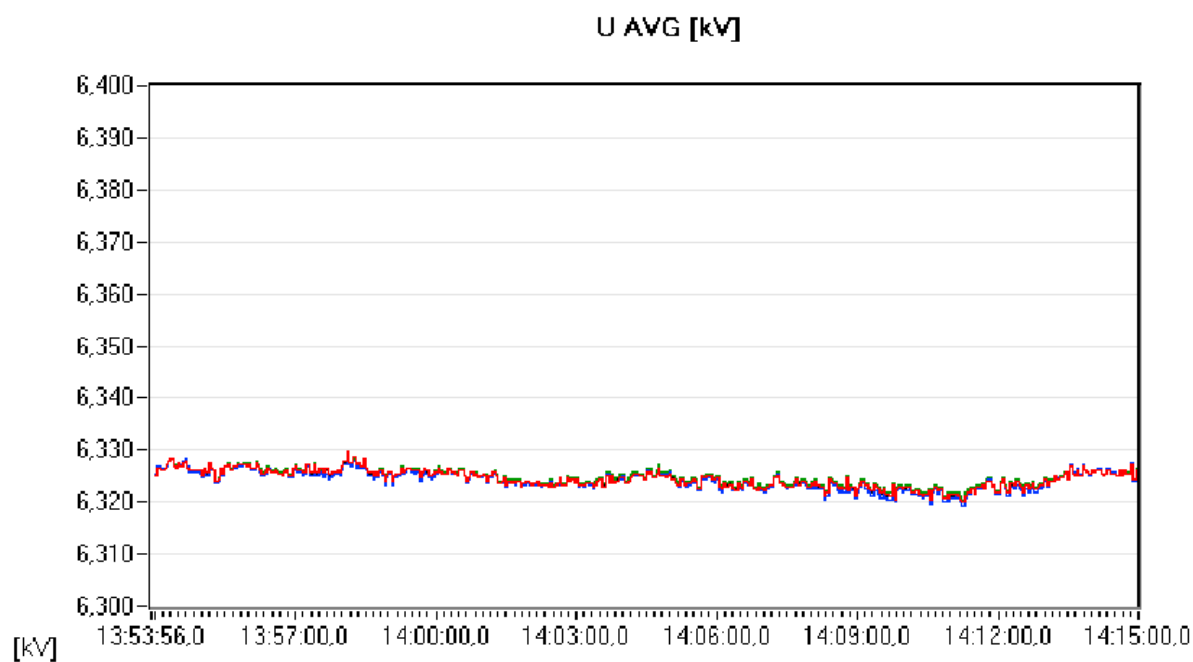


4. harmonická napětí na vývodu transformátoru T104

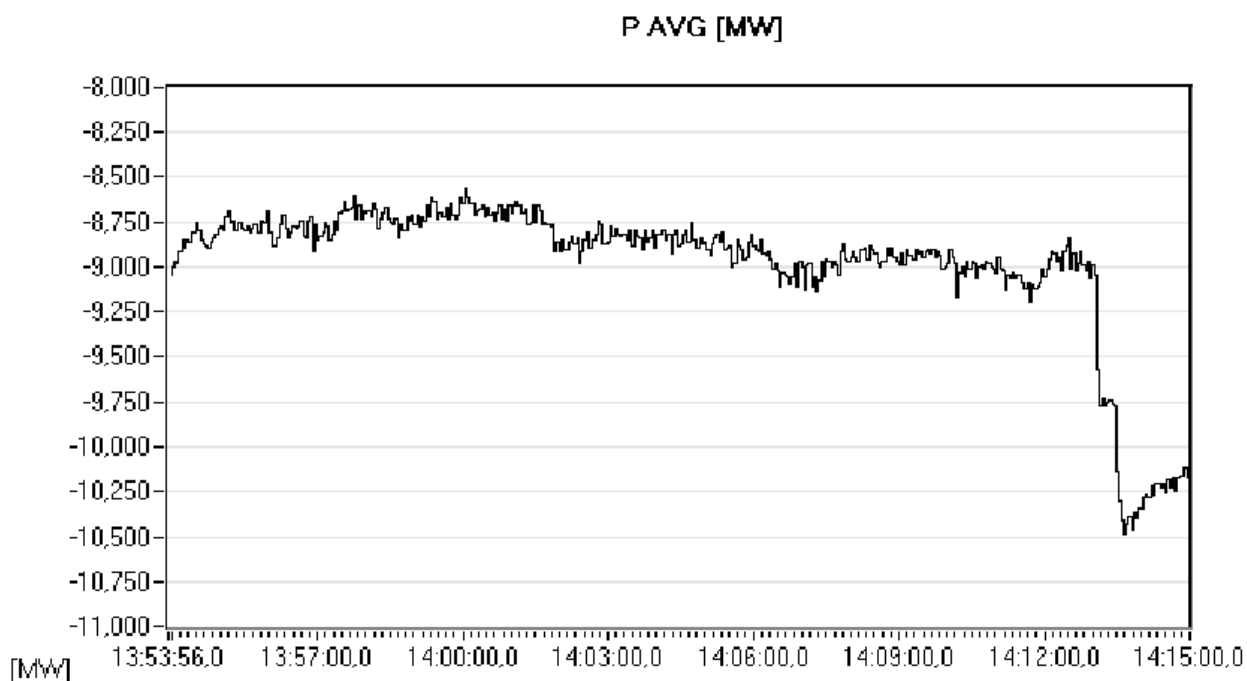


4. harmonická proudů na vývodu transformátoru T104

PŘÍLOHA 7 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU GENERÁTORU TG9

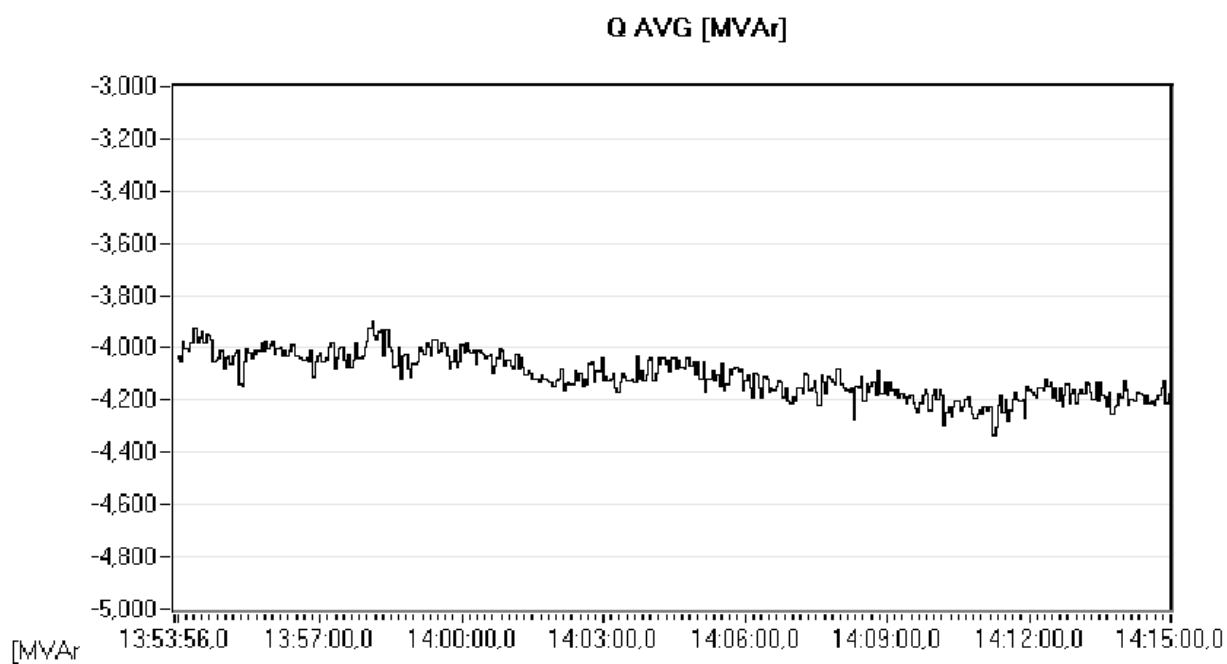


Napětí na vývodu generátoru TG9

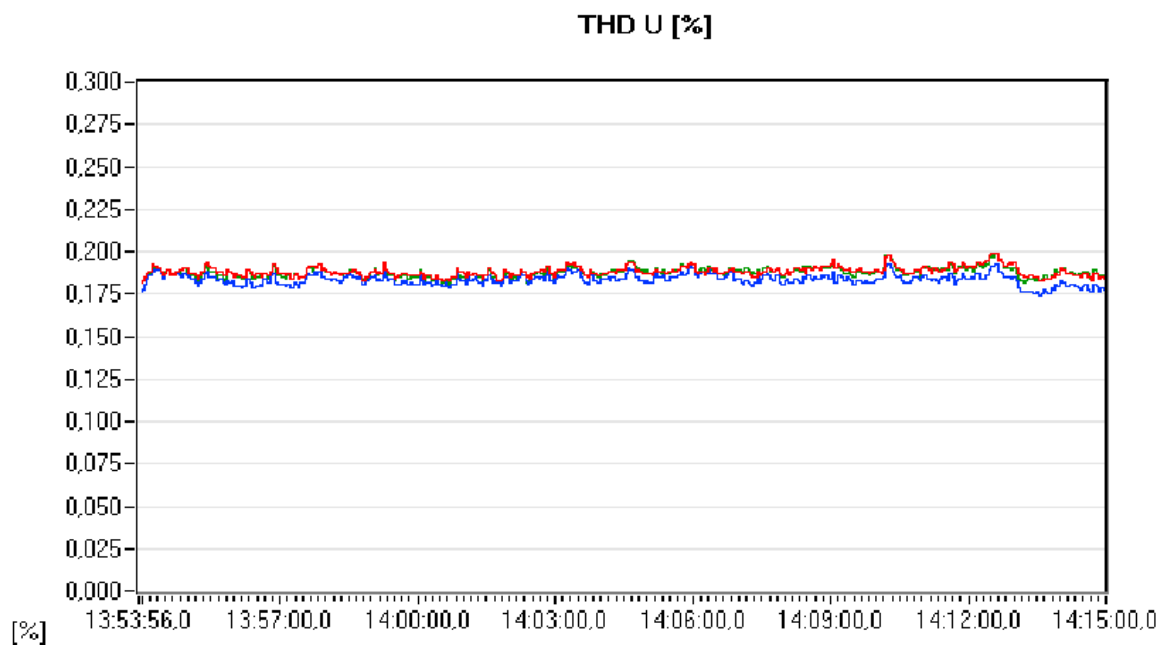


Činný výkon na vývodu generátoru TG9

PŘÍLOHA 8 – JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU GENERÁTORU TG9

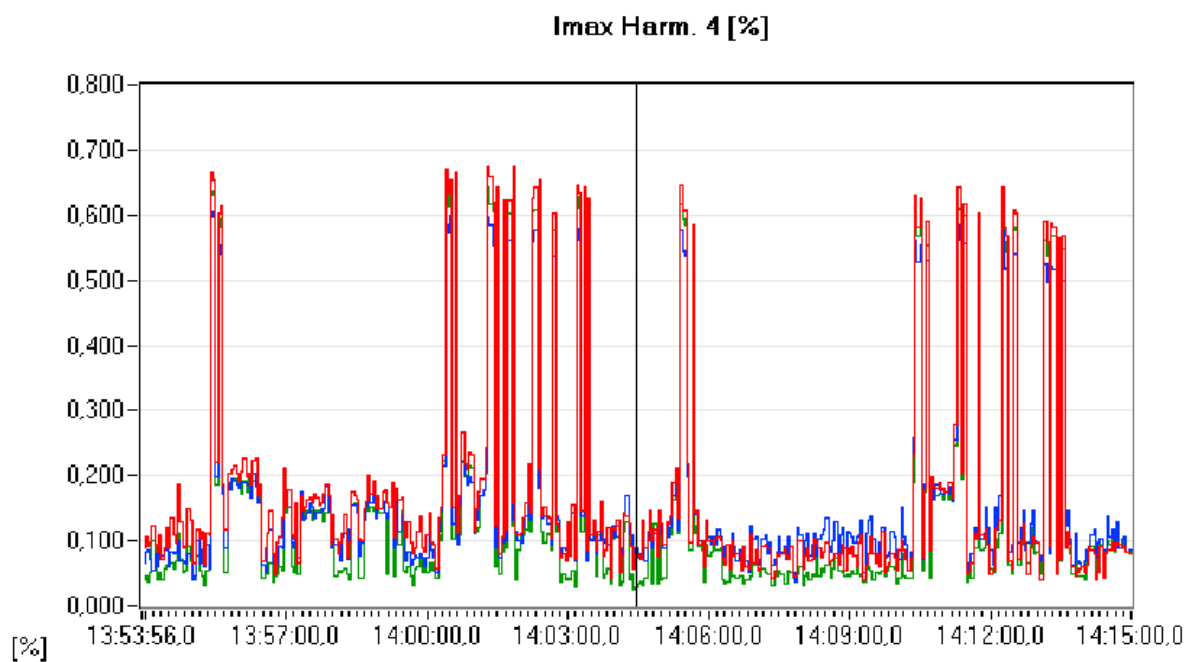
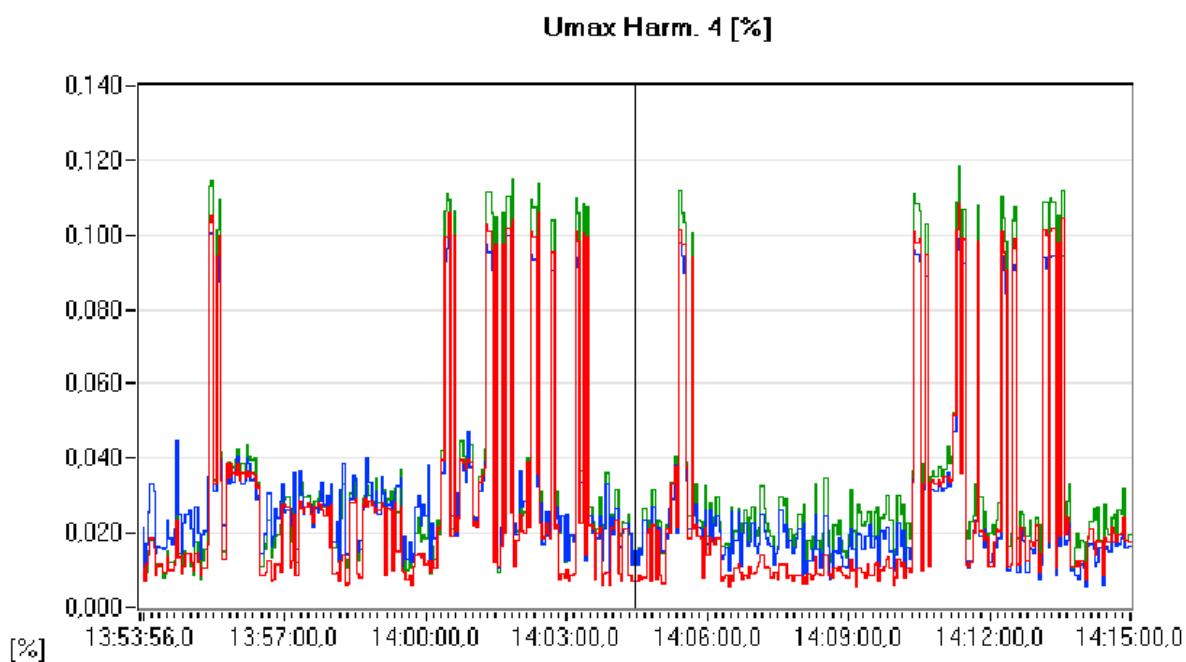


Jalový výkon na vývodu generátoru TG9

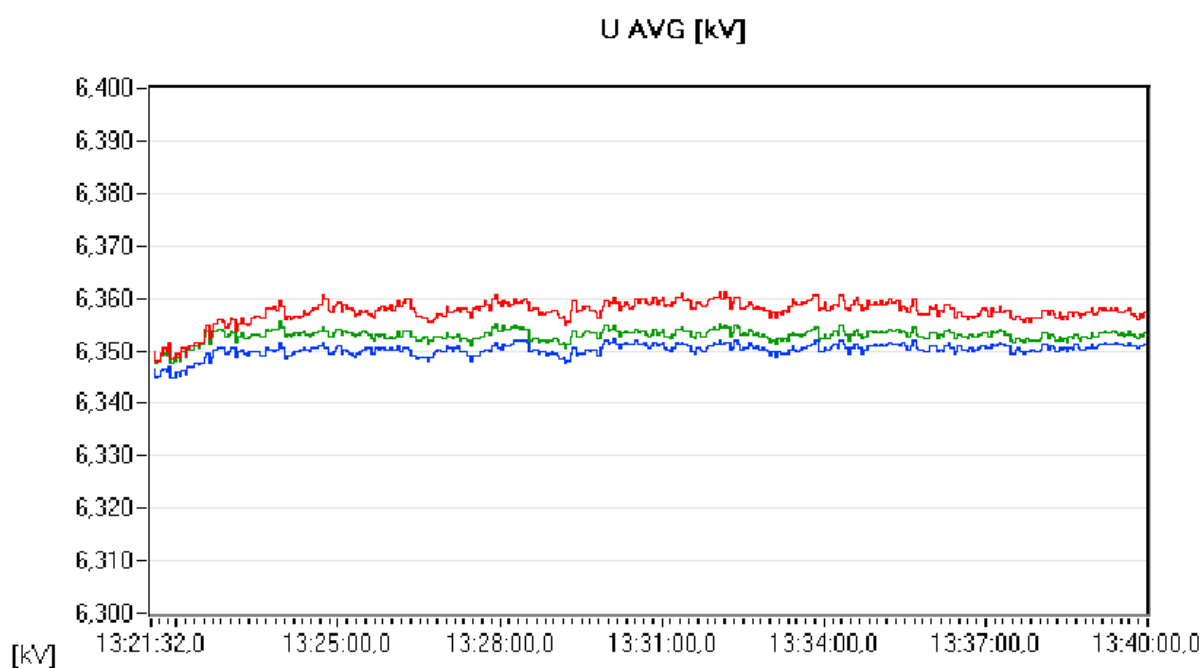


Činitel harmonického zkreslení na vývodu generátoru TG9

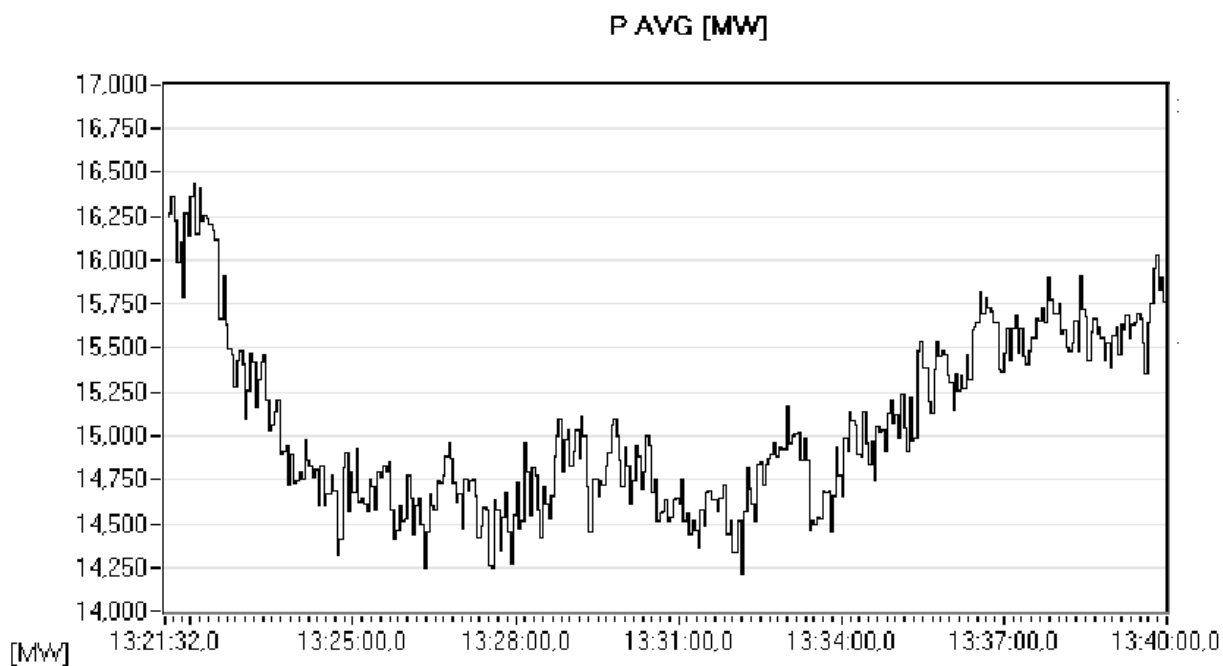
PŘÍLOHA 9 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU GENERÁTORU TG9



PŘÍLOHA 10 – NAPĚTÍ A ČINNÝ VÝKON NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T103

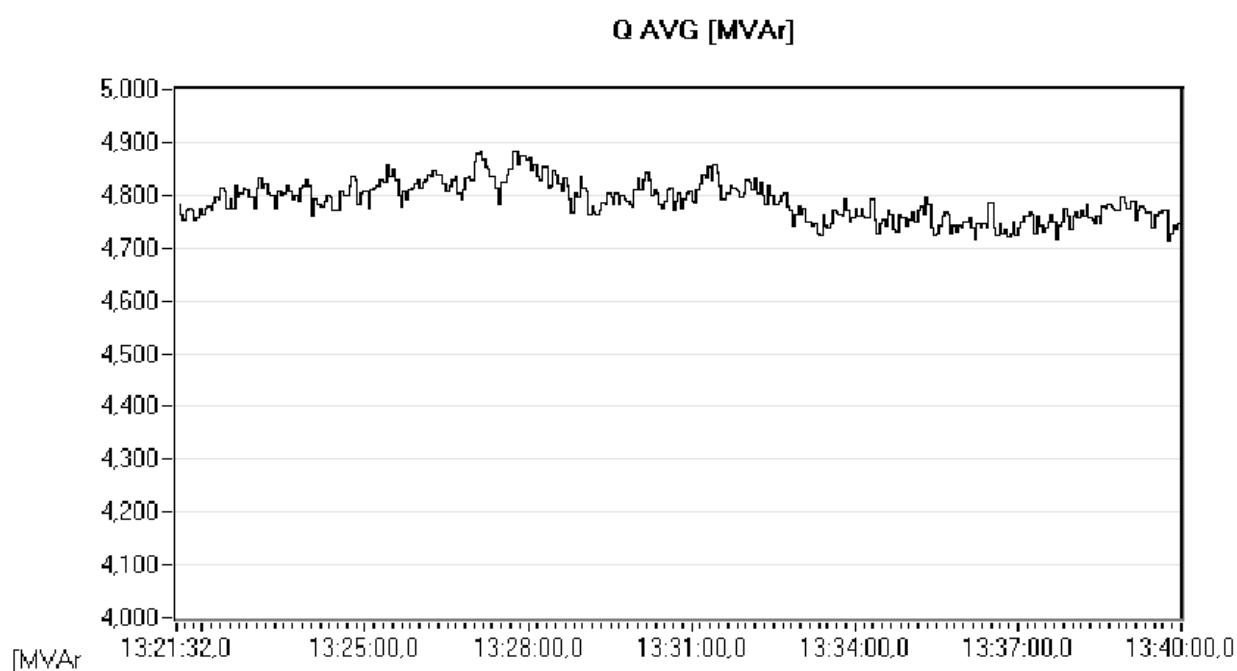


Napětí na vývodu transformátoru T103

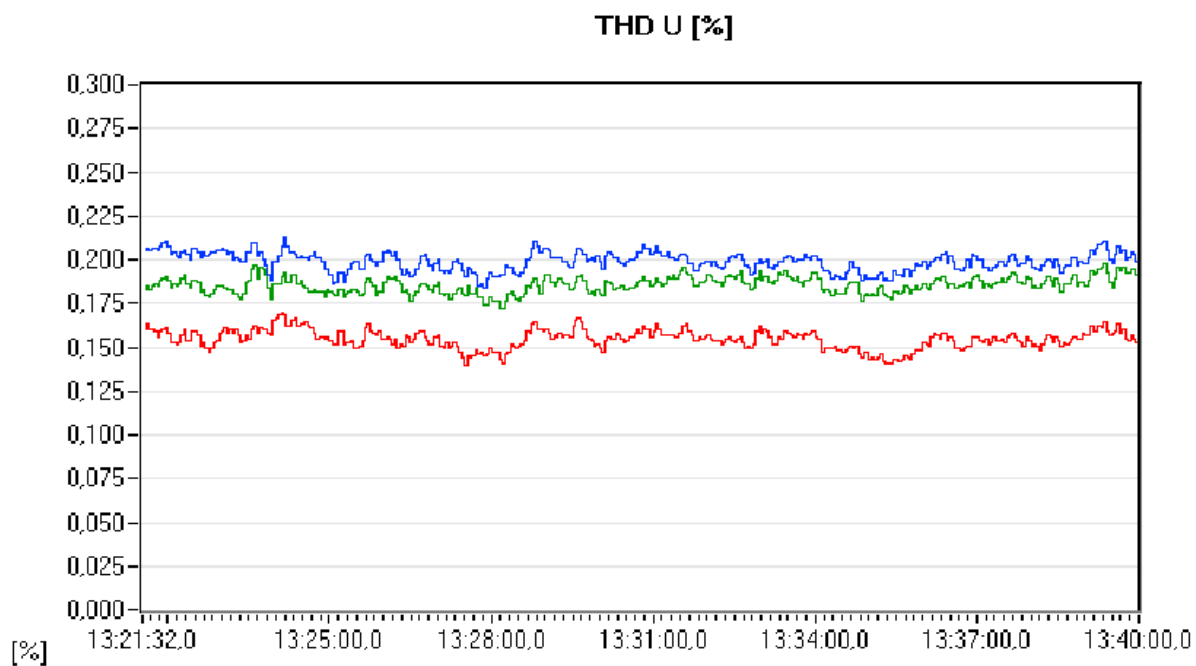


Činný výkon na vývodu transformátoru T103

PŘÍLOHA 11 – JALOVÝ VÝKON A CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T103

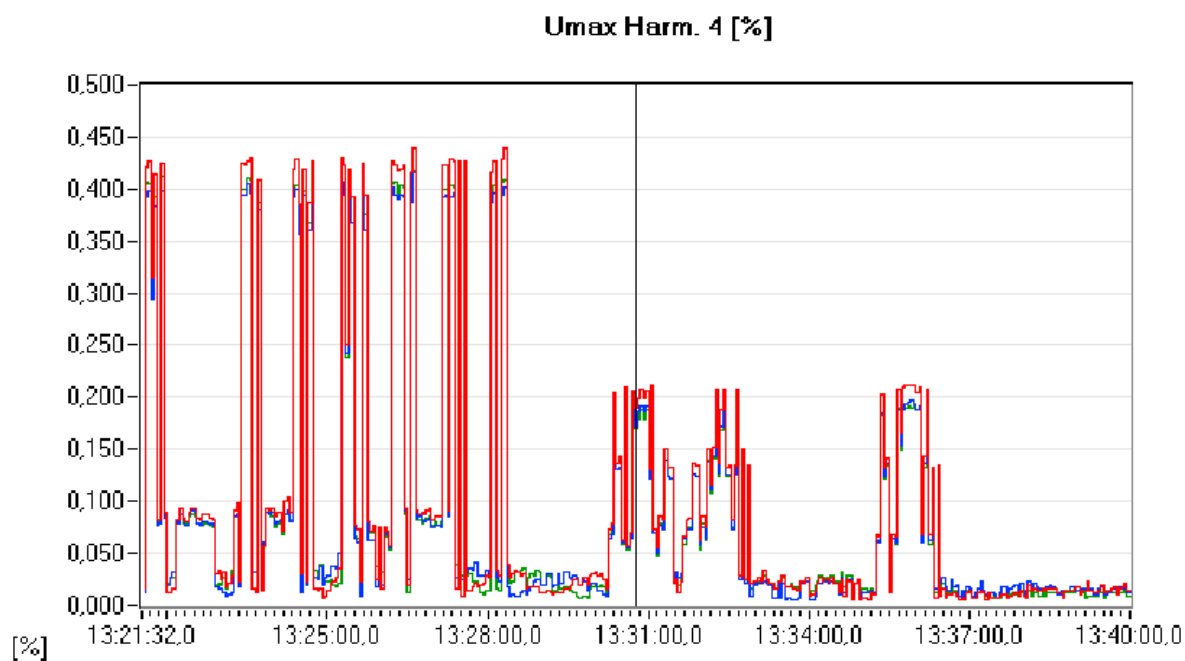


Jalový výkon na vývod transformátoru T103

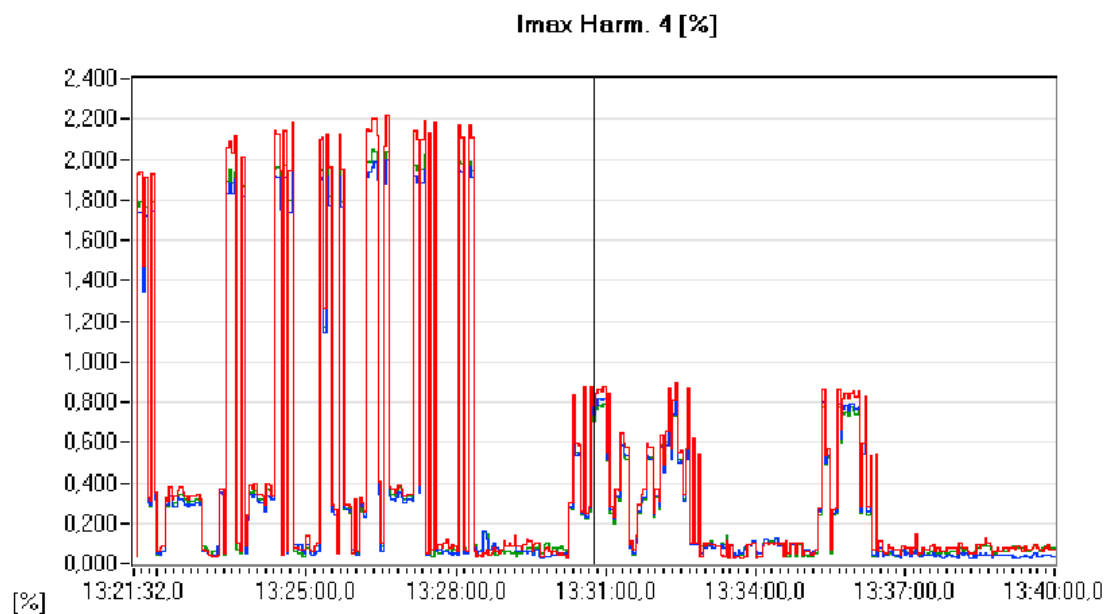


Činitel harmonického zkreslení na vývodu transformátoru T103

PŘÍLOHA 12 – VLIV HDO NA 4. HARMONICKOU NA VÝVODU TRANSFORMÁTORU T103

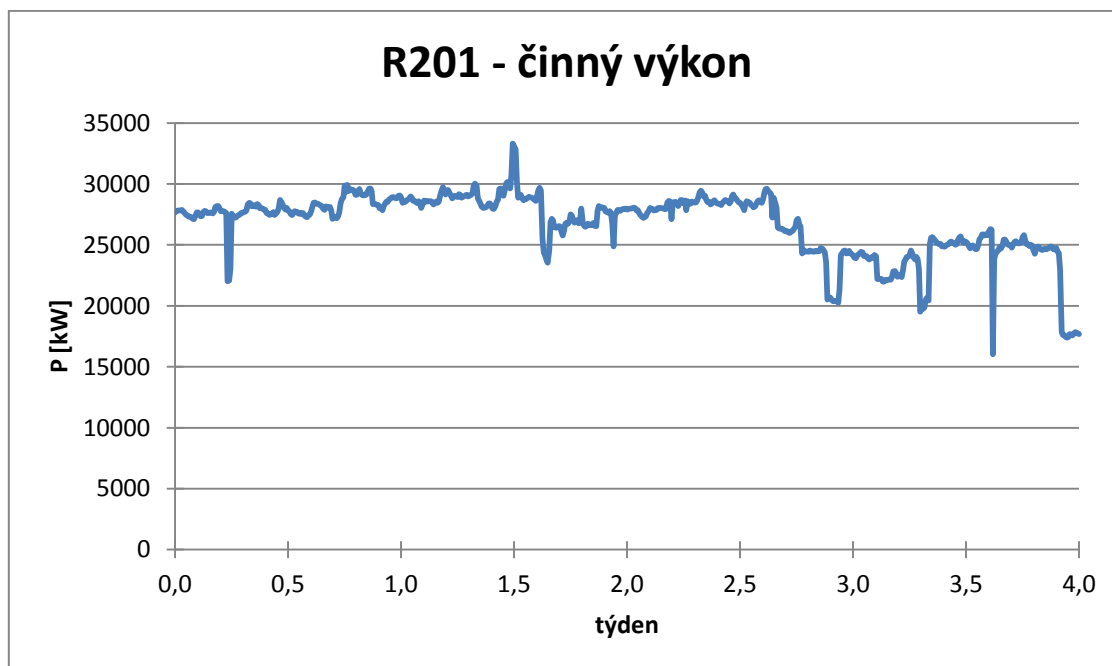


4. harmonická napětí na vývodu transformátoru T103

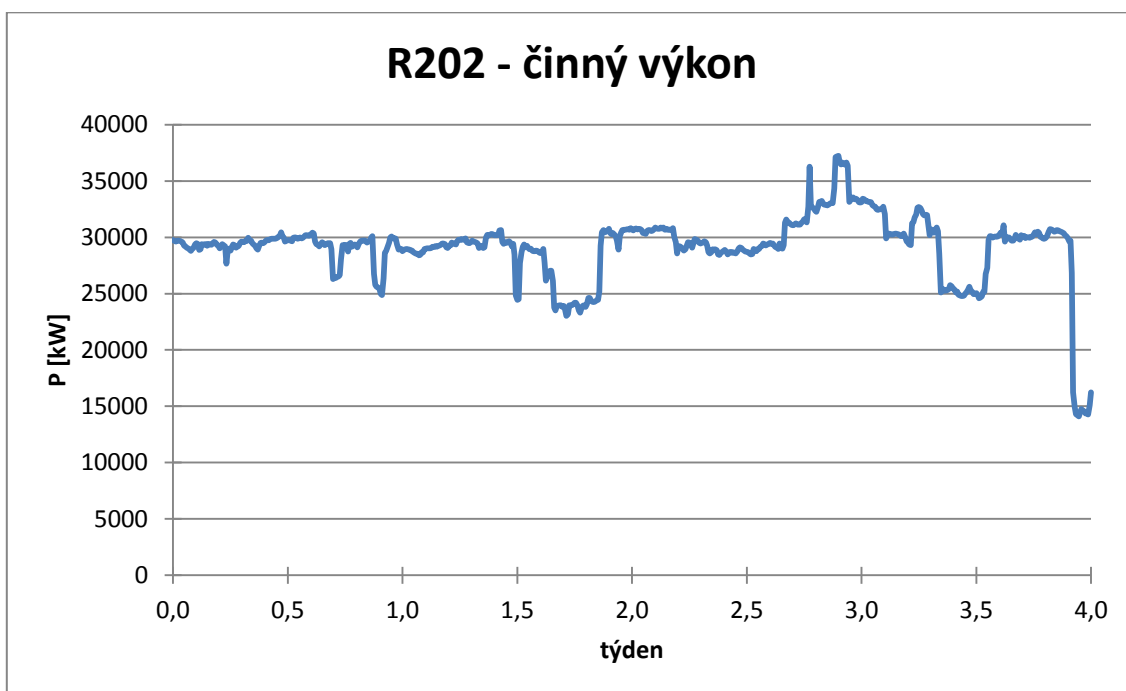


4. harmonická proudů na vývodu transformátoru T103

PŘÍLOHA 13 – MĚSÍČNÍ PRŮBĚHY ČINNÝCH VÝKONŮ NA R201 A R202 [27]

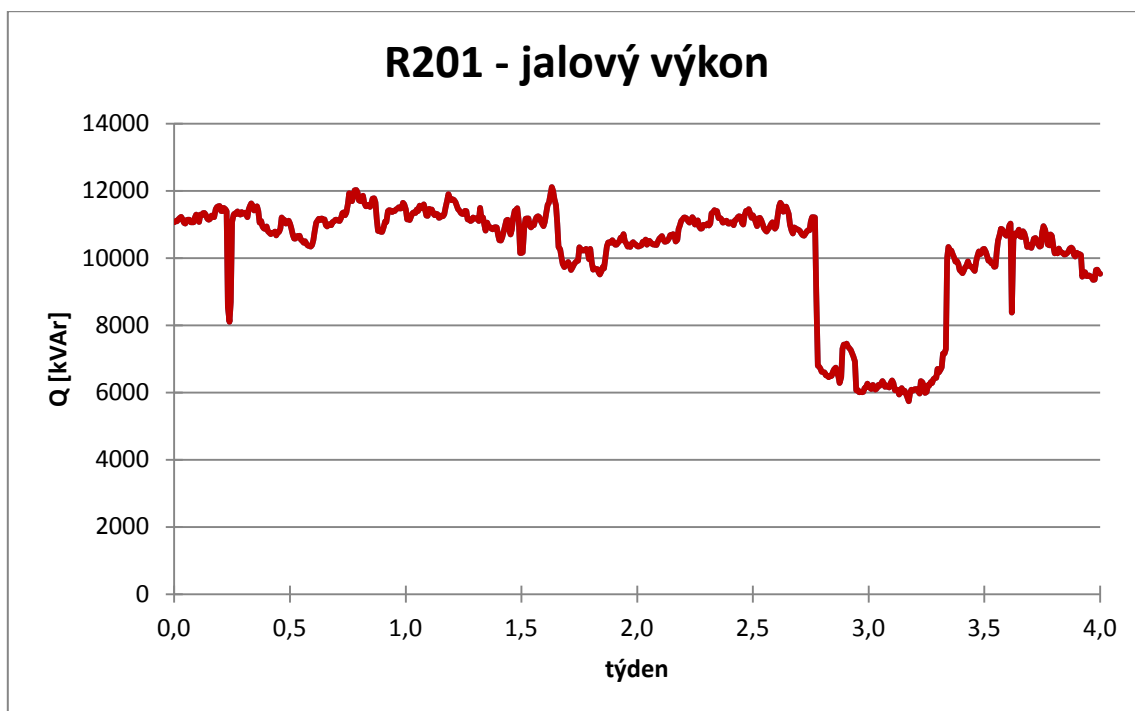


Průběh činného výkonu na rozvodně R201 za 1 měsíc

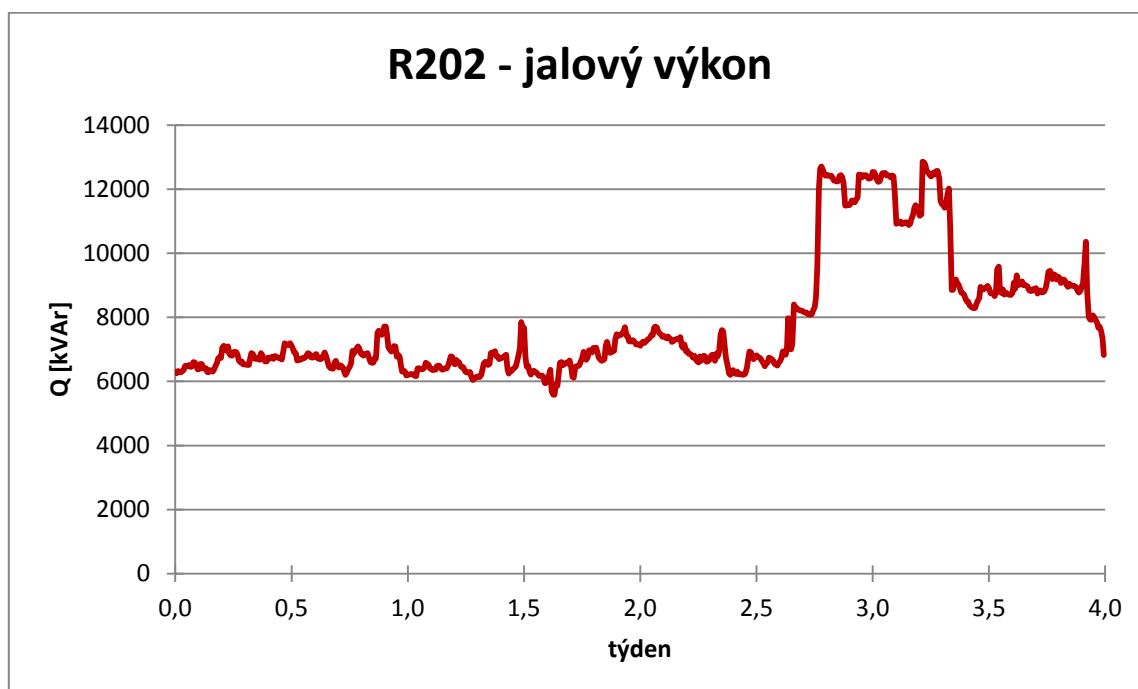


Průběh činného výkonu na rozvodně R202 za 1 měsíc

PŘÍLOHA 14 – MĚSÍČNÍ PRŮBĚHY JALOVÝCH VÝKONŮ NA R201 A R202 [27]

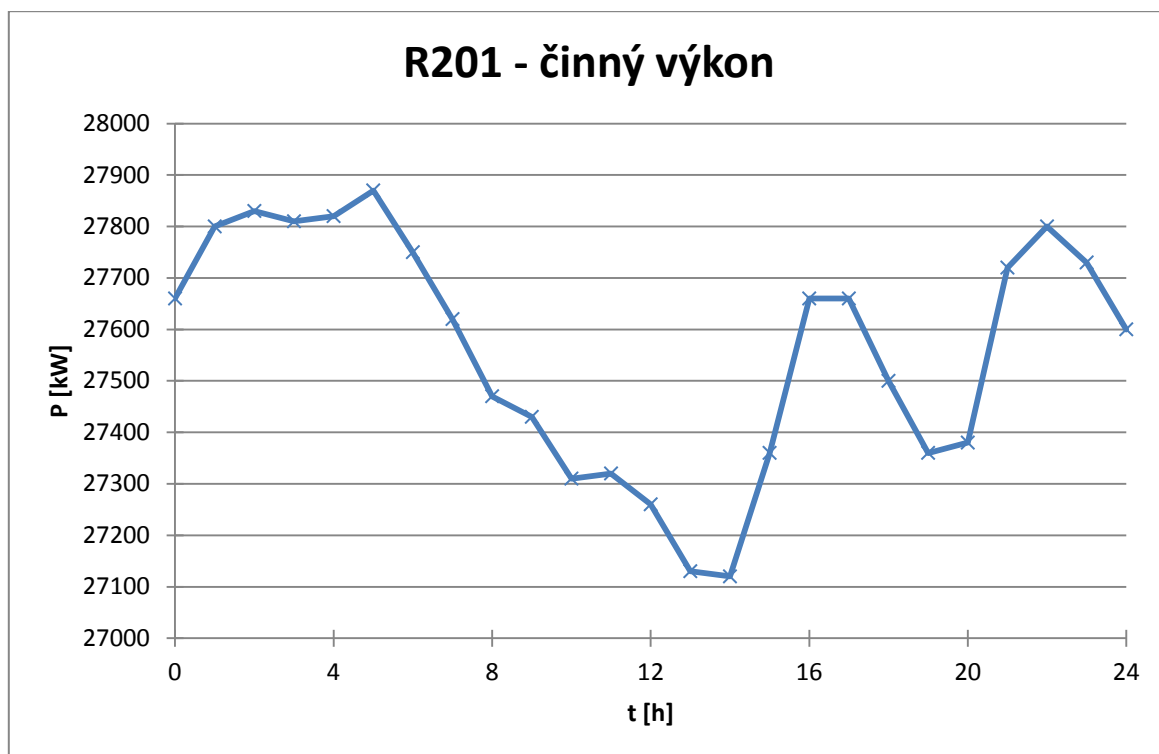


Průběh jalového výkonu na rozvodně R201 za 1 měsíc

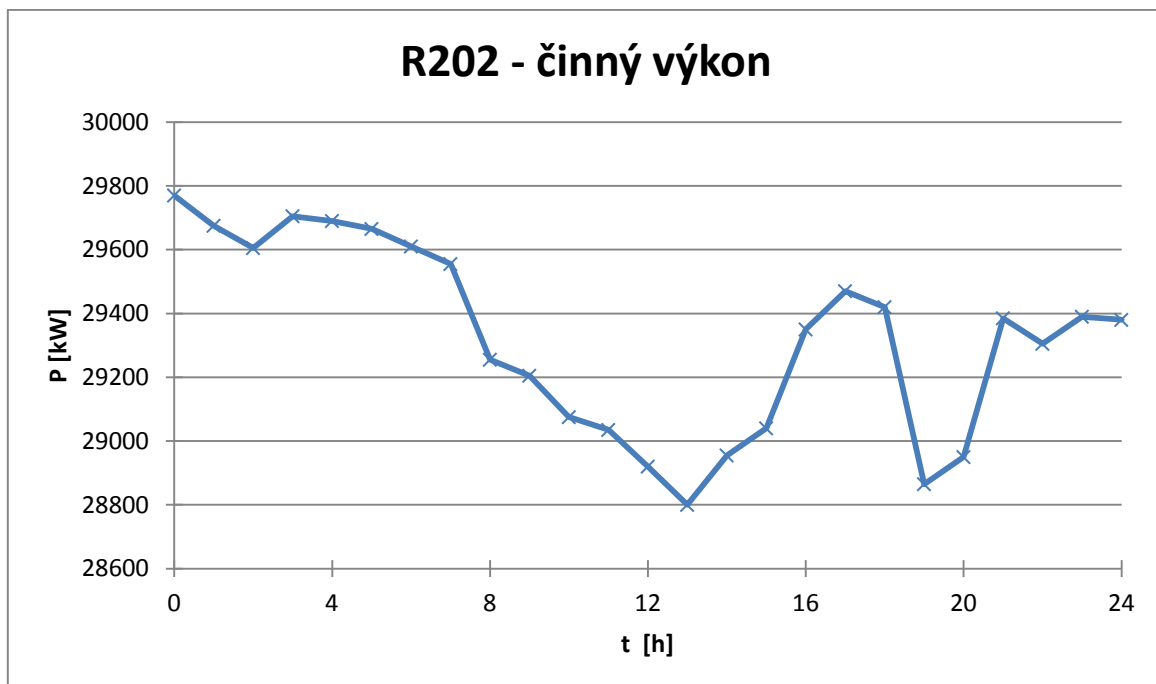


Průběh jalového výkonu na rozvodně R202 za 1 měsíc

PŘÍLOHA 15 – JEDNODENNÍ PRŮBĚHY ČINNÉHO VÝKONU NA R201 R202 [27]

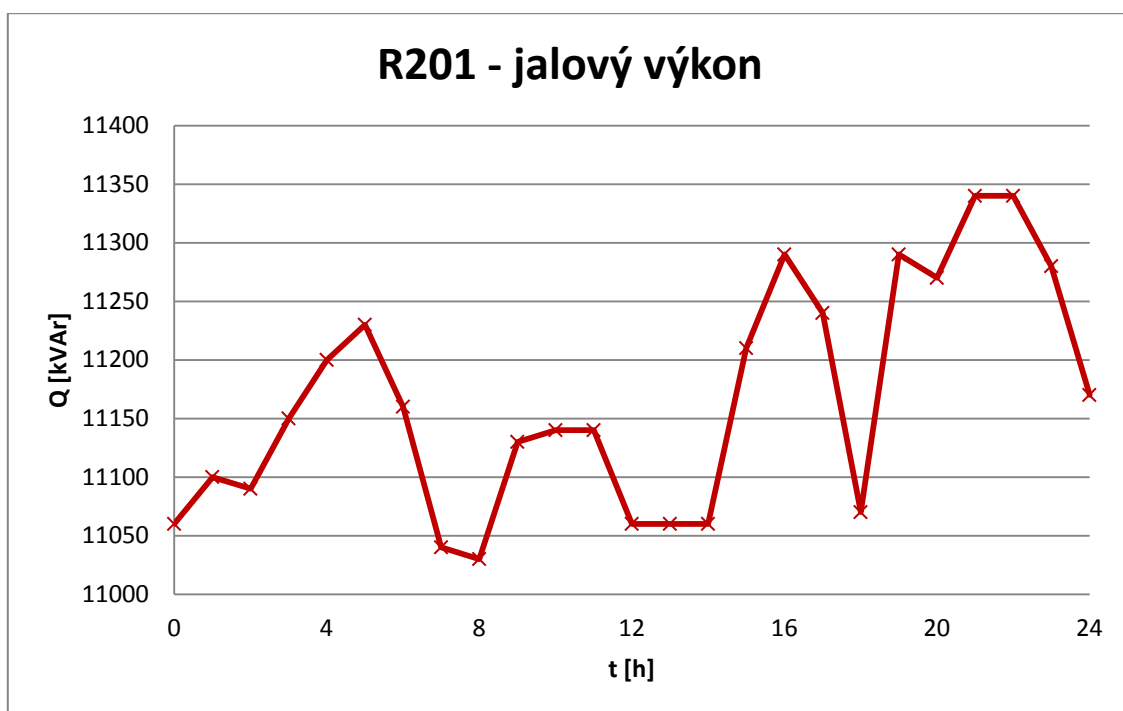


Jednodenní průběh činného výkonu na R201

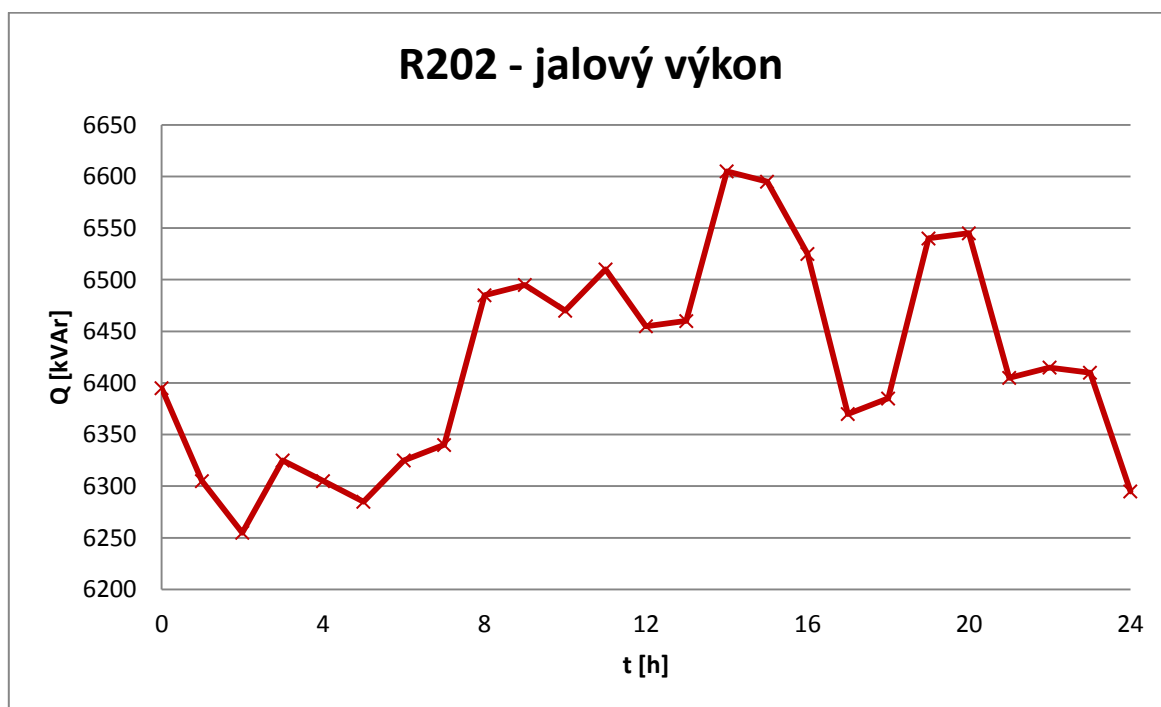


Jednodenní průběh činného výkonu na R202

PŘÍLOHA 16 – JEDNODENNÍ PRŮBĚHY JALOVÉHO VÝKONU NA R201 R202 [27]



Jednodenní průběh jalového výkonu na R201



Jednodenní průběh jalového výkonu na R202

PŘÍLOHA 17 – MOŽNÉ PŘIPOJENÍ STÁVAJÍCÍCH KOMPENZACÍ 2x10 MVar

